РАДИОФИЗИКА, ФОТОНИКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА

РФИВ 2026

Омск 6–8 октября

Тезисы докладов

IV Международной научной конференции

Институт радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омский государственный педагогический университет
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

РАДИОФИЗИКА, ФОТОНИКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА

Тезисы докладов
IV Международной научной конференции

Омск, 6–8 октября 2026 г.

РФИВ-2026

ОМСК
2026

УДК 53:621.383:544.03
ББК 32.95:32.84:24.5
Р15

Р15 Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества [Электронный ресурс] : тезисы докладов IV Международной научной конференции (Россия, Омск, 6–8 октября 2026 года). – Электрон. текст. дан. – Омск : ОНИИП, 2026.

УДК 53:621.383:544.03
ББК 32.95:32.84:24.5

Тезисы печатаются в авторской редакции, орфографии и пунктуации
Макет подготовлен в АО «ОНИИП»

Текстовое электронное издание.
Самостоятельное электронное издание

Минимальные системные требования:
процессор с частотой 1,3 ГГц или выше ; ОЗУ 512 Мб ;
Microsoft Windows XP/Vista/7/8/10 ; Adobe Acrobat Reader ; Foxit Reader

644071, Омский научно-исследовательский институт приборостроения
644071, Омск, ул. Масленникова, 231. Тел. (3812) 53-66-73

© АО «ОНИИП», 2026
© Авторы, 2026

Международный программный комитет

Березовский В.А.,	академик МАИ (Омск, Россия), ***сопредседатель****;*
Гуляев Ю.В.,	академик РАН (Москва, Россия), ***сопредседатель****;*
Абсаметов М.К.,	академик НАН РК (Алматы, Казахстан);
Асеев А.Л.,	академик РАН (Новосибирск, Россия);
Башкуев Ю.Б.,	д-р техн. наук (Улан-Удэ, Россия);
Белый В.Н.,	академик НАН Беларуси (Минск, Беларусь);
Бобров П.П.,	д-р физ.-мат. наук (Омск, Россия);
Бордонский Г.С.,	д-р физ.-мат. наук (Чита, Россия);
Голованова О.А.,	д-р геол.-минерал. наук (Омск, Россия);
Козлов А.Г.,	д-р техн. наук (Омск, Россия);
Колесник С.А.,	канд. физ.-мат. наук (Томск, Россия);
Кривальцевич С.В.,	канд. физ.-мат. наук (Омск, Россия);
Латышев А.В.,	академик РАН (Новосибирск, Россия);
Макыжанова А.Т.,	д-р Ph.D (Алматы, Казахстан);
Никитов С.А.,	академик РАН (Москва, Россия);
Оношко М.П.,	д-р геол.-минерал. наук (Минск, Беларусь);
Саломатов Ю.П.,	канд. техн. наук (Красноярск, Россия);
Сороцкий В.А.,	д-р техн. наук (Санкт-Петербург, Россия);
Струнин В.И.,	д-р физ.-мат. наук (Омск, Россия);
Черепенин В.А.,	академик РАН (Москва, Россия);
Цимбал В.А.,	д-р техн. наук (Серпухов, Россия);
Шипилов С.Э.,	д-р физ.-мат. наук (Томск, Россия).

Организационный комитет

Кривальцевич С.В., председатель,	АО «ОНИИП» (Омск);
Сафонова О.А., ответственный секретарь,	АО «ОНИИП» (Омск);
Бадамшина П.А., ответственный редактор,	АО «ОНИИП» (Омск);
Веремеев И.В.,	АО «ОНИИП» (Омск);
Доберштейн С.А.,	АО «ОНИИП» (Омск);
Зачатейский Д.Е.,	АО «ОНИИП» (Омск);
Зубова И.А.,	АО «ОНИИП» (Омск);
Косарев Б.А.,	ОмГТУ (Омск);
Машинская С.Г.,	АО «ОНИИП» (Омск);
Пономарева Е.С.,	АО «ОНИИП» (Омск);
Потуданская М.Г.,	ОмГУ (Омск);
Романов Ю.В.,	АО «ОНИИП» (Омск);
Ультаракова А.А.	ИМиО (Алматы);
Шагарова Л.В.	ИРФЭ ОНЦ СО РАН (Омск);
Шепет С.В.	АО «ОНИИП» (Омск);
Яковлев А.Н.,	АО «ОНИИП» (Омск);
Ященко А.С.,	ИРФЭ ОНЦ СО РАН (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНАЯ ЧАСТЬ

П. П. Бобров, А. В. Репин, О. В. Родионова **14**
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОЧВ И ОСАДОЧНЫХ ПОРОД
А. С. Воробьев, К. А. Трушкин **17**
МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ПЛАТФОРМА «ЭЛЬБРУС» ДЛЯ ЗАДАЧ ЦОС И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ МИКРОПРОЦЕССОРОВ
Ю. Н. Вольхин **19**
О НЕКОТОРЫХ КЛЮЧЕВЫХ ПРОБЛЕМАХ В ОБЛАСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ РАДИОФОТОНИКИ (MICROWAVE PHOTONICS)

ФИЗИКА ИЗЛУЧЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН, ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ

А. А. Аверин, В. Ю. Ким, В. П. Полиматиди, В. И. Сахтеров **22**
АНТЕННА ВЕРТИКАЛЬНОГО И НАКЛОННОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ
Н. Е. Агарков, Ю. А. Костычов, К. А. Майненгер, А. В. Бучельников, С. В. Кривальцевич **25**
ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТЕЛЮЩИХСЯ СИЛЬНО СВЯЗАННЫХ АНТЕНН КВ-УКВ ДИАПАЗОНА
М. М. Анишин, Л. П. Радио, К. В. Иванова, Л. А. Лубковская **29**
КОРРЕКЦИЯ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ IRI ПО ПАРАМЕТРАМ B_0 и B_1
В. П. Беличенко, Т. И. Чурикова **32**
МЕТОДЫ РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕРЕДАЮЩЕЙ КРУГЛОЙ РАМОЧНОЙ АНТЕННЫ
С. А. Борисевич **35**
АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ F2-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КВ-РАДИОВОЛН, ОТ УРОВНЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ПЕРИОД 25-ГО ЦИКЛА
М. А. Бузова, А. С. Круглов **39**
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАСС РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В АРЕАЛАХ РАБОТЫ РАДИОСТАНЦИЙ ОВЧ/УВЧ ДИАПАЗОНОВ
Р. Р. Бутрик **42**
ПУТИ МИНИМИЗАЦИИ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПОМЕХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ АНТЕННО-ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ КВ-ДИАПАЗОНА
А. В. Бучельников **45**
СПОСОБ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ЕМКОСТЕЙ НА ИМПЕДАНС УСТРОЙСТВ СОГЛАСУЮЩИХ СИММЕТРИРУЮЩИХ С МАСЛЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ
Г. Г. Вертоградов, В. Д. Черных **49**
ВОЗДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОЙ БУРИ 20 ЯНВАРЯ 2026 Г. НА МАКСИМАЛЬНО НАБЛЮДАЕМУЮ ЧАСТОТУ
А. Л. Гаврик, Л. А. Луканина **52**
ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ, ПОЛУЧЕННОГО ПО ДАННЫМ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ
М. М. Гаврилов, А. В. Груша, П. В. Куприянов, С. А. Силаев, Е. В. Терешкин **55**
ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В КВАДРАТУРНОЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ
К. А. Голубева **58**
ИССЛЕДОВАНИЕ АНТЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ОРБИТАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ
Т. К. Жусупов **61**
ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛОЙ АНТЕННЫ НА ЕЕ ПАРАМЕТРЫ

Н. С. Ламкова, Е. Д. Бычков **64**
МЕТОД АДАПТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ГРАНИЦ ЛОКАЛЬНОЙ СТАЦИОНАРНОСТИ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДВАЖДЫ СЕЛЕКТИВНЫХ РАДИОКАНАЛАХ ВЫСОКОМОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ
К. А. Майненгер **67**
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОЙ АНТЕННЫ В СРЕДЕ С ПОТЕРЯМИ
С. А. Останин, А. В. Касаткин, В. В. Щербинин, Г. В. Грибова **70**
ПАССИВНАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ ДЕТЕКТОРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА АТОМАХ РИДБЕРГА
И. В. Петров, А. А. Комаров, П. В. Луферчик, А. И. Шивейко, А. А. Репин **73**
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДЕТЕКЦИЯ СИГНАЛОВ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ С ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ
И. В. Романов **76**
ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СРЕЗЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2-СЛОЯ НАД ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИЕЙ «ЭЛЕКТРОУГЛИ»
Е. А. Рубцов **79**
О ВНЕДРЕНИИ НАПРАВЛЕННЫХ АНТЕНН В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
Е. А. Рубцов **82**
ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ТЕРРИТОРИИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЗОНЫ ДЕЙСТВИЯ ОБЗОРНОГО РАДИОЛОКАТОРА
Р. А. Рычков, С. В. Кривальцевич **84**
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА НАПРАВЛЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
Ю. П. Саломатов, В. С. Панько, А. В. Минаков **88**
РАСЧЕТ ВЫСОТНЫХ МНОЖИТЕЛЕЙ В ЗАДАЧЕ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ВОКРУГ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
В. М. Селезнев, М. С. Манахова, И. С. Сорокин, А. А. Трушанин **91**
ФАЗОВАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛЕЙ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛУЧОМ КОНФОРМНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ
Л. В. Шагарова, А. С. Ященко **95**
ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ FENGYUN-3 ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ РАДИОСВЯЗИ
А. О. Щирый **98**
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ: ПОДСИСТЕМА ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРНЫХ РАДИОЛИНИЙ

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА, ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

А. А. Александров, А. Ю. Куклев, В. И. Струнин, Н. А. Чириков **101**
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛАРМОРОВСКОГО РАДИУСА ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА
А. М. Бадамшин, В. С. Ковивчак, Е. В. Князев **104**
ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ
К. С. Бакланова, А. Г. Козлов, М. Г. Потуданская **106**
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА
П. П. Бобров, Ю. А. Костычов, О. В. Родионова **110**
ЯЧЕЙКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКОСТЕЙ И ПОЧВ НА ОСНОВЕ ОТРЕЗКА МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

Д. А. Борейко, С. А. Подлиннов, О. И. Павлова, Т. С. Тимошенко, А. И. Тюменцев **113**
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК МОНОАЛЮМИНАТА НЕОДИМА ($NdAlO_3$), ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ
С. А. Варнаков, Т. Б. Клименко, А. О. Никифорова, С. С. Коломоец **116**
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПЕСКА В ОТДЕЛЬНЫХ ТИПАХ ПОЧВ НА ИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
О. А. Гулевич, Л. Б. Волкомирская, А. Е. Резников **119**
ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИНАМИКИ СПЕКТРА ГЕОРАДАРНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ГЛУБОКОМ ЗОНДИРОВАНИИ
Т. Б. Клименко, С. А. Варнаков, А. С. Ященко, С. В. Кривальцевич **122**
ВЛИЯНИЕ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА МОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СВЯЗИ КВ-ДИАПАЗОНА
Ю. А. Костычов, О. В. Родионова, А. В. Репин **125**
РЕЗОНАНСНЫЙ МИКРОПОЛОСКОВЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЧВЫ
Ю. А. Костычов, К. А. Майненгер, А. В. Бучельников, Н. Е. Агарков, С. В. Кривальцевич, С. А. Варнаков, А. С. Ященко **129**
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЧВЫ НА ПРИЗЕМНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ
В. П. Крылов, Р. А. Чирков **132**
ШИРОКОПОЛОСНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИ ПАДЕНИИ ВОЛНЫ ПОД УГЛОМ БРЮСТЕРА
Ж. Ә. Оңласынов, М. М. Муратова **135**
ОЦЕНКА МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА КАРАТОБИНСКОГО РАЙОНА ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ SENTINEL-2 В СРЕДЕ GOOGLE EARTH ENGINE
К. В. Немчанов, А. С. Ященко **138**
О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ АКТУАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЗЗ ИЗ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ
С. А. Подлиннов, Т. С. Тимошенко, А. В. Берликов, А. В. Фатеев **141**
ИЗМЕРЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖКИ НА ОСНОВЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ
А. В. Репин, О. В. Родионова **144**
ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЧВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКА С ОТКРЫТЫМ КОНЦОМ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ
А. В. Репин, О. В. Родионова **147**
РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЧВЫ, ИЗМЕРЕННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ ДАТЧИКОВ
А. В. Смотров **150**
ОБ ОГРАНИЧЕНИЯХ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ ПРИ БЕСКОНТАКТНОМ СЪЕМЕ ИНФОРМАЦИИ 150
Д. В. Соколов, Ю. А. Стенькин, В. В. Болотов, Е. В. Князев Н. А. Давлеткильдеев, С. Н. Несов, К. Е. Ивлев **153**
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЕВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК С ОКСИДОМ РЕНИЯ (IV) ПРИ ЭКСПОЗИЦИИ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ГАЗАХ
С. Д. Ханин, Ю. С. Остроумова 156
СПЕКТРОСКОПИЯ ПОЛНОЙ ПРОВОДИМОСТИ КАК МЕТОД ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ДИНАМИКИ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ
М. В. Шестаков **159**
ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАНОСТЕРЖНЕЙ ОКСИДА ЦИНКА
И. А. Южаков, Б. З. Гармаев, Э. Ч. Хартаева, А. В. Номоев **161**
ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОЧАСТИЦ КАРБОНИЛЬНОГО ЖЕЛЕЗА С СИЛИКОНОВОЙ МАТРИЦЕЙ В ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТАХ

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

Н. Е. Агарков **167**
К ВОПРОСУ О ВЕЛИЧИНЕ ПАРАЗИТНОЙ ЕМКОСТИ МЕЖДУ ПРЯМЫМ И ОБРАТНЫМ ПРОТЯЖЕННЫМИ ПРОВОДНИКАМИ СОГЛАСУЮЩЕЙ ЦЕПИ МАЛОГАБАРИТНОГО РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО СОГЛАСУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА КВ-ДИАПАЗОНА
Г. А. Акентьев **171**
О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ТРОПОСФЕРНОЙ РАДИОСВЯЗИ В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ
А. В. Андросов, М. М. Гаврилов, Ф. А. Егоров, Н. А. Желвицкий, П. В. Куприянов, Ю. А. Орлов, Е. В. Терешкин **174**
ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАДИОМЕТРИИ В СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ
И. Ю. Братухин, А. Ф. Крячко, Г. М. Ревунов **178**
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
А. А. Вителюева **181**
АНАЛИЗ УГРОЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
Э. Р. Жданов, А. В. Крюков, О. С. Харина, А. В. Волков, Д. С. Степынин **184**
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
Д. Е. Зачатейский **187**
МЕТОДИКА РАСЧЕТА КАЧЕСТВА СВЯЗИ НА ДАЛЬНИХ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОЛИНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
Я. В. Копцов, Я. А. Илюшин **191**
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПОЛЯРИЗОВАННОГО МИКРОВОЛНОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКАХ
Б. А. Косарев, Ф. А. Букин, Д. В. Михайлов, Д. В. Лазарев **194**
ВЗАИМОВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И НАГРУЗКИ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОСТАНЦИЙ И РАДИОЦЕНТРОВ
Я. Е. Львович, А. П. Преображенский, И. А. Тихонов **198**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ
Ю. Б. Минин **201**
ОПТИМИЗАЦИЯ ХРАНЕНИЯ КРЫЛОВСКОГО БАЗИСА ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАССЕЯНИЯ
О. В. Салтыков **204**
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛНОСВЯЗНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ДЕМОДУЛЯЦИИ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В СЛОЖНЫХ КАНАЛАХ СВЯЗИ
А. С. Табакова, Д. М. Четтер, С. М. Кулясов **207**
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОСЦИЛЛЯТОРА ДУФФИНГА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ В УСЛОВИЯХ СТОХАСТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА
А. В. Тюкин **210**
СФЕРИЧЕСКИЙ ПРОВОДНИК В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ
Чжао Хунли, Я. А. Илюшин **213**
МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ УЗКОНАПРАВЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ В ПРИЗЕМНОМ ТУМАНЕ
А. С. Юрков **216**
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СПИРАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕРДЕЧНИКОМ

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

В. И. Алексеенков, А. А. Вялов, А. В. Груша, М. М. Гаврилов П. В. Куприянов, М. В. Лебедев, С. С. Семенюк, С. А. Силаев, Е. В. Терешкин **219**
ГЕРМЕТИЧНЫЕ МИКРОМОДУЛИ СВЧ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА НА ОСНОВЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСОВ
Л. Т. Ануарова, Д. А. Ермаков, Д. В. Холодняк, А. И. Тюменцев, А. Н. Яковлев **222**
ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ УЗКОПОЛОСНЫХ ИНВЕРТОРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ДИАПАЗОН ЧАСТОТНОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ПОЛОСОВЫХ LC-ФИЛЬТРОВ
А. О. Афонин, И. В. Говорун, М. Ю. Горн, Ал. А. Лексиков, А. В. Угрюмов **225**
ВОЛНОВОДНЫЙ ФИЛЬТР С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВСТАВКАМИ В Е-ПЛОСКОСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ
А. О. Афонин, И. В. Говорун, Ал. А. Лексиков, А. В. Угрюмов **228**
ШИРОКОПОЛОСНЫЙ МИНИАТЮРНЫЙ МОНОЛИТНЫЙ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР
М. И. Бойчук, С. А. Демин, Л. А. Васильева **230**
ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТНИ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ В МИНИАТЮРНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСАХ
С. П. Букин, С. В. Крутиев, М. А. Михайлов, В. Н. Корж, Э. Р. Шаповалов **234**
КВАЗИЭЛЛИПТИЧЕСКИЙ SIW ФИЛЬТР НА ОСНОВЕ ГРЕБНЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ
И. В. Веремеев, А. С. Веремеева **237**
МИНИАТЮРИЗАЦИЯ STW-РЕЗОНАТОРОВ НА ЧАСТОТЫ 200–1000 МГЦ
К. А. Галкина, А. О. Ложников **239**
ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫЕ КВАРЦЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
П. В. Гейдт, В. Р. Шаяпов, А. Л. Богословцева, С. Ю. Чепкасов **241**
АКУСТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ ГГц-ДИАПАЗОНА С БРЭГГОВСКИМ ОТРАЖАТЕЛЕМ, ВЫРАЩЕННЫЕ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ
К. А. Григорьев, Ю. И. Егошин, Т. С. Тимошенко, А. Н. Яковлев **243**
ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ТИПОРАЗМЕРА 1206
П. Н. Дробот, А. И. Солдатов **246**
ПОРОГОВЫЙ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОГО ОСЦИЛЛИСТОРА В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ
И. А. Евмененко **249**
РАЗРАБОТКА ЦЕПИ ТЕРМОКОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА
Ю. И. Егошин, А. И. Тюменцев, А. Н. Яковлев **252**
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СПИРАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРОВ
Н. М. Жилин, Т. Н. Улаева, А. Ю. Куклев, Н. А. Чириков, Ю. С. Зонова, А. Н. Кузнецов **255**
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО ОАВ-РЕЗОНАТОРА С РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТОЙ 7 ГГц
В. И. Карагусов, С. А. Доберштейн **258**
ГЕНЕРАТОР, УПРАВЛЯЕМЫЙ НАПРЯЖЕНИЕМ, НА ЧАСТОТУ 993 МГц С ДВУХВХОДОВЫМ STW-РЕЗОНАТОРОМ
Н. В. Кобылянский, С. А. Доберштейн, И. В. Хоменко **260**
ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ГЕНЕРАТОР НА ЧАСТОТУ 1000 МГц С ОДНОВХОДОВЫМ РЕЗОНАТОРОМ НА STW
В. Н. Корж, С. П. Букин, М. А. Михайлов, С. В. Крутиев **262**
ВОЛНОВОДНЫЙ КВАЗИЭЛЛИПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР НА КАСКАДЕ ГРЕБНЕВЫХ СИНГЛЕТОВ
А. О. Ложников, Р. С. Нагорнов **264**
СТОЙКОСТЬ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СЛУЧАЙНОЙ ВИБРАЦИИ
Т. В. Ложникова, А. Г. Козлов **267**
РЕЗОНАТОРЫ ИЗ ЛАНГАСИТА НА ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

М. А. Михайлов, С. В. Крутиев, С. П. Букин, В. Н. Корж, Э. Р. Шаповалов **270**
ВОЛНОВОДНЫЙ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР НА ТРЕХ ТОНКИХ РЕЗОНАНСНЫХ ДИАФРАГМАХ
А. А. Савченко, А. Г. Козлов **272**
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРАЛЬНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ФАЛЬСИФИКАТА
С. А. Тарасенко, С. В. Крутиев **274**
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КВАЗИЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ ФИЛЬТРОВ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЗОНАТОРАМИ
А. И. Тюменцев, А. А. Тюменцева, Т. С. Тимошенко, А. Н. Яковлев **277**
ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР НА КОАКСИАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРАХ
А. А. Тюменцева, А. И. Тюменцев, Т. С. Тимошенко, А. Н. Яковлев **280**
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УКОРАЧИВАЮЩИХ КОНДЕНСАТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ SIW-РЕЗОНАТОРОВ
А. Е. Уразбеков, П. Е. Троян, Ю. В. Сахаров **282**
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕМРИСТОРОВ СО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ НА ОСНОВЕ ОСТРОВКОВЫХ ПЛЕНОК АЛЮМИНИЯ
Х. Д. Фам **284**
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ-УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ КЛАССА F НА ЧАСТОТЕ 2,4 ГГц НА ОСНОВЕ GaN-ТРАНЗИСТОРА
И. В. Филиппов **287**
ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ В ЦЕПИ ПИТАНИЯ АВТОГЕНЕРАТОРА НА ЕГО ФАЗОВЫЙ ШУМ
А. А. Шабронов **289**
ПОВЫШЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ПОКРЫТИЯ РАДИОКАНАЛА 433 МГц С ПОМОЩЬЮ НАСТРАИВАЕМОЙ ПЕЧАТНОЙ АНТЕННЫ
Э. Р. Шаповалов, С. В. Крутиев, С. П. Букин, М. А. Михайлов **291**
ВОЛНОВОДНЫЙ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР НА ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

М.В. Батищева, В.И. Анисимова **293**
ОСОБЕННОСТИ РЕЗКИ МНОГОСЛОЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ
А. Л. Богословцева, П. В. Гейдт **297**
ВЛИЯНИЕ Al НА ШЕРОХОВАТОСТЬ Mo В БРЭГГОВСКОМ ОТРАЖАТЕЛЕ НА ОСНОВЕ ПАРЫ Al/Mo
Н. А. Давлеткильдеев **299**
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА В ИНДИВИДУАЛЬНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ АЗОТОМ
Е. И. Дьяченко, В. А. Чуклин, А. С. Паленова, А. Н. Кузнецов **301**
ПРЕЦИЗИОННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПРЕФОРМ ПРИПОЯ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ МЕТОДОМ АЛМАЗНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ РЕЗКИ
Н. М. Егоров, А. А. Левицкий, Л. А. Лишнев, П. С. Маринушкин **304**
К ОЦЕНКЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА КРЕМНИЕВОГО АВТОЭМИССИОННОГО КАТОДА
Н. М. Жилин, Т. Н. Улаева, А. Ю. Куклев, Н. А. Чириков, Ю. С. Зонова, А. Н. Кузнецов **307**
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО СЛОЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ОАВ-РЕЗОНАТОРА С БРЭГГОВСКИМ ОТРАЖАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК МОЛИБДЕНА И ТИТАНА
В. С. Ковивчак, С. Н. Несов, А.Ю. Куклев **310**
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТОНКИХ ПЛЕНОК AlN, ПОЛУЧЕННЫХ РЕАКТИВНЫМ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ, И ЕГО МОДИФИКАЦИЯ МОЩНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

С. С. Коломоец **312**
ВОЗДЕЙСТВИЕ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ
И. А. Корж, В. В. Вареник, Ю. С. Зонова **315**
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ К ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ РАЗРЯДАМ
И. А. Корж, Ю. С. Зонова **318**
РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОСПЛАМЕНИТЕЛЯ С НИЗКОЙ ЭНЕРГИЕЙ ЗАЖИГАНИЯ С МНОГОСЛОЙНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ
И. А. Корж, А. Ю. Куклев **321**
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЬ С ПИРОТЕХНИЧЕСКИМ СОСТАВОМ
И. А. Корж, Н. А. Чириков, В. В. Вареник, Ю. С. Зонова **324**
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЬ С БОЛЬШОЙ ВЕЛИЧИНОЙ БЕЗОПАСНОГО ТОКА И НИЗКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ ИНИЦИИРОВАНИЯ
С. А. Кузнецова, М. В. Батищева, В. И. Анисимова **327**
ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КЕРАМИКИ
А. Ю. Куклев, Л. В. Баранова, Н. А. Давлеткильдеев, В. И. Струнин, Н. А. Чириков **330**
ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СКАНДИЯ НА СВОЙСТВА ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ
И. А. Лобов, С. Н. Несов, Е. С. Земсков **333**
ВЛИЯНИЕ Р-БЕНЗОХИНОНА НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПОЛИАНИЛИНА
А. А. Мальгинова, А. Ю. Куклев, В. И. Струнин **336**
РАДИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ
С. А. Матюшенко, С. Н. Несов **339**
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЁМКОСТНЫЕ СВОЙСТВА СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ МАТРИЦ И ДИОКСИДА МАРГАНЦА, ДОПИРОВАННОГО ИОНАМИ КАЛИЯ
А. С. Паленова, А.Д. Дорохов, К. А. Варков **342**
ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГЕРМЕТИЗАЦИИ МИНИАТЮРНЫХ РЕЗОНАТОРОВ 342
П. А. Пятанова, Т. В. Ложникова **345**
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ТРАВЯЩЕГО РАСТВОРА И ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДЛЯ КАТАНГАСИТА
Р. Р. Сафин, В. Р. Иванова **347**
МЕТОДИКА СРАВНЕНИЯ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПУСКОВОГО ТОКА ПО ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ДИОДЫ S2M
Д. Е. Уткин, Д. И. Рогило **350**
ФОРМИРОВАНИЕ Au-BLACK ПОКРЫТИЙ
Д. Е. Уткин **352**
ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРФОРИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛЁНОК МЕТОДОМ ИНВЕРСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ
Е. А. Фадина, А. Г. Козлов **354**
ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВЫХ МИКРОЭЛЕКТРОДОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ РАСТВОРОВ
С. Д. Ханин, Ю. С. Остроумова 357
НА ПОДСТУПАХ К ПРОДВИЖЕНИЮ В АКТУАЛЬНЫХ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ВОПРОСАХ ФИЗИКИ МЕТАЛЛООКСИДНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК
В. Р. Шаяпов, С. Ю. Чепкасов, А. Л. Богословцева, П. В. Гейдт **360**
ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛАЗМЫ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

ФОТОНИКА

А. Г. Антонян, А. А. Маликов, В. И. Казаков **362**
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ
В ПРОЦЕССЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ БЕССЕЛЬ-ГАУССОВА ПУЧКА
Е. И. Богданова, Т. Г. Никулина, М. В. Дашков **365**
АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ
НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ
Л. И. Вострикова, И. А. Карташев **367**
ФАЗОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ ПРИ СОЗДАНИИ ОБЪЁМНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ПОЛИНГОМ
ФОТОИНТЕГРИРОВАННЫХ МИКРОРЕШЁТОК АНИЗОТРОПИИ
Н. В. Горбачев, А. Б. Клещенков **369**
ПОТЕРИ ВВОДА В ПЛАЗМОННЫЙ ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ: СОЕДИНЕНИЕ ВСТЫК,
СТУПЕНЧАТЫЙ И ПЛАВНЫЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ
В. В. Давыдовская, В. Н. Навныко, А. В. Федорова **371**
АДРЕСНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДВУМЕРНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ
КРИСТАЛЛАХ BSO И BTO ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ И ВНЕШНИМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ
А. С. Евтушенко, М. В. Дашков, А. В. Бурдин **374**
МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ РАДИОФОТОНИКИ
А. Р. Зангараев, Т. К. Румянцев, Ю. Р. Янгличева **376**
БПЛА-АМФИБИИ: НАВИГАЦИЯ, СВЯЗЬ И СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ В ДВУХ СРЕДАХ
А. Р. Зангараев, Т. К. Румянцев, Ю. Р. Янгличева **379**
ОДНОФОТОННЫЙ ЛИДАР ДЛЯ МГНОВЕННОГО ТРЕКИНГА МАЛОВЫСОТНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
В. А. Зиновьев, А. В. Ненашев, А. А. Шкляев **382**
АНТИОТРАЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА ЗА СЧЁТ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ
В ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЯХ
В. Р. Иванова, Н. Е. Колесников **385**
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ СВЕТОДИОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ
СВЕТА В СВЕТОВЫХ УСТРОЙСТВАХ НА РАВНОМЕРНОСТЬ ОДНОРОДНОСТИ
СВЕТОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ
В. И. Казаков, О. В. Шакин, С. В. Акимов **388**
ОСОБЕННОСТИ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ БЕССЕЛЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ
В КРИСТАЛЛЕ $NaBi(MoO_4)_2$
М. Э. Костюлин, А. А. Спектор, А. А. Мурасев **391**
ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЯ И ПРЕВЫШЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ НИВЕЛИРНЫХ
СИСТЕМАХ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ДЛЯ КОДИРОВАНИЯ
НИВЕЛИРНОЙ РЕЙКИ
А. О. Никифорова, Н. А. Давлеткильдеев, С. В. Кривальцевич **395**
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА ВЧ-УВЧ ДИАПАЗОНОВ
В РАДИОФОТОННОЙ СИСТЕМЕ С ПРЯМОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ГЛУБИНЕ
МОДУЛЯЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
А. С. Параскун, В. И. Казаков, Я. А. Рывкина **398**
ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДИАГНОСТИКИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ
ДЛЯ РАННЕГО ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ВОЗГОРАНИЯ
С. А. Покотило, К. В. Кайков **401**
ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОФОТОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ
Н. А. Прохоров, В. П. Шпак **404**
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ LIDAR-СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ
М. Ю. Прудникова, Д. В. Белякова, Д. Д. Бутманов, И. С Маринкин, Т. П. Савчук **406**
ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАССИВОВ
НАНОТРУБОК АНОДНОГО ОКСИДА ТИТАНА

И. П. Руденок, А. И. Руденок **409**
АДАПТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
А. А. Шкаев **411**
ПРИМЕНЕНИЕ ПИРОМЕТРОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА
А. А. Шкляев **413**
ЭКСТРЕМАЛЬНО СИЛЬНЫЕ И ШИРОКОПОЛОСНЫЕ АНТИОТРАЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ ТЕЛЛУРА

П. П. Бобров, А. В. Репин, О. В. Родионова
Омский государственный педагогический университет, Омск, Российская Федерация

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОЧВ И ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Аннотация. Представлены результаты применения диэлектрического метода для измерения содержания глины в почвах и оценки петрофизических характеристик нефтеносных пород: размера пор, гидравлической проницаемости, пористости, минерального и химического составов. При исследовании влажных почв и пород использовались корреляционные связи параметров процессов диэлектрической релаксации с их свойствами, при исследовании сухих образцов – различия в диэлектрической проницаемости песчаных и глинистых пород.
Ключевые слова*:* диэлектрические измерения, почвы, осадочные породы, глины, минеральный состав, химический состав.
Для цитирования*:* Бобров П. П., Репин А. В., Родионова О. В. Диэлектрический метод исследования свойств почв и осадочных пород // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

P. P. Bobrov, A. V. Repin, O. V. Rodionova
Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russian Federation

DIELECTRIC METHOD FOR STUDYING SOILS AND SEDIMENTARY ROCKS PROPERTIES

Abstract. The paper presents the results of applying the dielectric method to measuring clay content in soils and assessing the petrophysical properties of oil-bearing rocks: pore size, hydraulic permeability, porosity, and mineral and chemical compositions. When studying wet soils and rocks, correlations between the parameters of dielectric relaxation processes and their properties were used, while when studying dry samples, differences in the permittivity of sandy and clay rocks were used.
Keywords*:* dielectric measurements, soils, sedimentary rocks, clays, mineral composition, chemical composition.
For citation*:* Bobrov P. P., Repin A. V., Rodionova O. V. Dielectric method for studying soils and sedimentary rocks properties // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

По результатам измерений диэлектрической проницаемости почв и горных пород в широкой полосе частот имеется большое количество работ. В основном это работы описательного характера. Исследования почв связаны с выяснением влияния влажности, температуры, засоленности, содержания глины и гумуса на комплексную диэлектрическую проницаемость. По данным диэлектрических измерений определяют обычно пористость и влажность почв дистанционными микроволновыми методами.

Диэлектрические методы интенсивно используются также для исследования пород нефтеносных месторождений, чаще всего песчаников и алевролитов. Обычно используются низкие частоты от миллигерц до 1 кГц. В этой частотной области моделируется эффект вызванной поляризации – релаксация поляризации породы после воздействия сильного электромагнитного импульса. Однако попытки установить универсально значимые взаимосвязи между петрофизическими характеристиками пород (размером пор и проницаемостью) и временем релаксации для песчаников самого разного происхождения потерпели неудачу. Созданы разные модели этого явления, однако они основаны на конкретных предположениях, которые выполняются не для всех пород.

Нами разработан ряд методов, использующих для определения свойств почв и осадочных пород диэлектрические измерения. Были исследованы твердые образцы нефтеносных осадочных пород, выполненные в виде цилиндров диаметром около 30 мм и высотой 8-11 мм, в сухом состоянии и насыщаемые дистиллированной водой и водными растворами соли NaCl. Диэлектрические измерения производились при постепенном уменьшении количества солевого раствора путем центрифугирования образца, находящегося в измерительной ячейке. Коэффициент водонасыщености (отношение доли раствора к пористости) изменялся от 0,98–1, до 0,20–0,25. Измерения в диапазоне частот 100 Гц – 500 МГц производились в ячейке, представляющей собой отрезок коаксиальной линии с внутренним диаметром внешнего проводника 70 мм.

При уменьшении водонасыщенности значения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ε' на частотах выше 10 МГц и ниже 20 кГц монотонно уменьшаются. В промежуточном частотном диапазоне при уменьшении влажности эти значения могут быть выше, чем при максимальной влажности. Этот релаксационный процесс, вызванный поляризацией, возникающей на границе вода-воздух, описывался нами моделью Коула-Коула. Благодаря хорошо заметному влиянию этого процесса на спектры значений ε' и tgδ его параметры могут быть определены достаточно точно. Интенсивность процесса $\Delta\varepsilon_s$ явно выраженной зависимости от доли раствора и его проводимости не имеет. При средних значениях водонасыщенности этот параметр изменяется мало и его среднее значение хорошо коррелирует с гидравлической проводимостью и средним размером пор, особенно при увлажнении образцов дистиллированной водой (рис.1*а*,*б*). Время релаксации этого процесса хорошо коррелирует с гидравлической проводимостью и средним размером пор при насыщении солевым раствором с концентрацией 4 г/л.

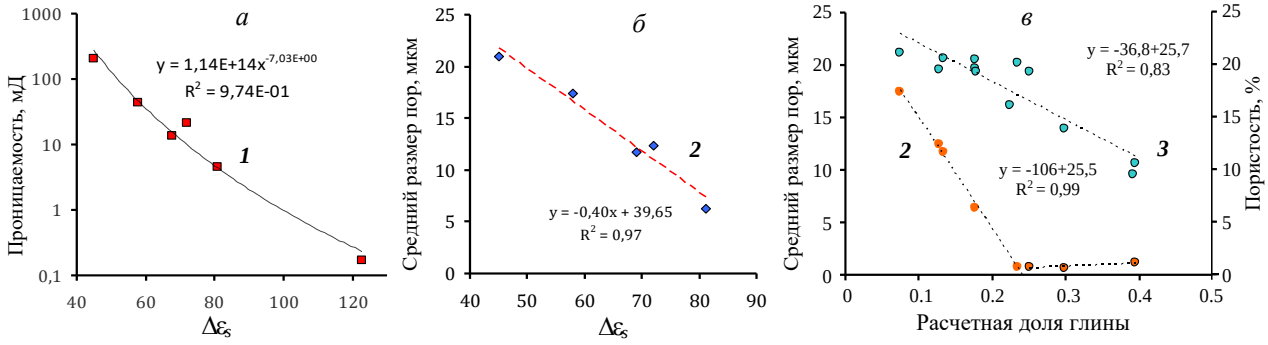


Рис. 1. *Взаимосвязь петрофизических характеристик образцов осадочных пород с результатами диэлектрических измерений.*
1 – гидравлическая проницаемость; 2 – средний размер пор; 3 –пористость

Измерение диэлектрической проницаемости сухих образцов позволило определить в них содержание глины, оценить минеральный и химический состав. Метод основан на различии в диэлектрической проницаемости песчаных (3.8-5) и глинистых минералов (7.5-11) и использовании модели диэлектрической смеси. Порода вначале рассматривалась как двухфазная среда, содержащая воздух и твердую фазу, затем твердая

фаза рассматривалась как смесь песчаной и глинистой фракций. Найденные диэлектрическим методом значения содержания глины удовлетворительно согласуются с результатами, полученными методом ЯМР, и хорошо коррелируют с размером пор и пористостью (рис.1*в*). При оценке минерального состава образцов использовались данные о диэлектрической проницаемости и плотности образцов и минералов. С учетом химического состава минералов и их долей в образцах, найденных диэлектрическим методом, произведена оценка содержания основных химических элементов и проведено сравнение с результатами, полученными методом электронной микроскопии. Получено удовлетворительное совпадение для элементов, доля которых в образцах превышает 5–6%.

Почвы имеют более высокую пористость, поэтому высокочастотный релаксационный процесс в них слабо выражен. Кроме того, при изменении влажности не удается поддерживать одинаковую плотность и пористость. Для определения содержания глины мы учли, что с возрастанием количества глины в них увеличиваются действительная и мнимая части (ε' и ε'') комплексной диэлектрической проницаемости. Это увеличение объясняется низкочастотным релаксационным процессом. Интенсивность этого процесса в незасоленных почвах хорошо коррелирует с содержанием глины (частиц размером менее 10 мкм). Сопоставляя значение интенсивности с содержанием глины, измеренное методом седиментации, мы получили регрессионное уравнение для определения глинистости. Результаты показаны на рис. 2*а*. Близкие значения получаются, если связывать с содержанием глины значения ε' и ε'', измеренные на частоте 100 кГц.

В другом методе, не требующем калибровки, мы учли различие в диэлектрической проницаемости песчаной и глинистой фаз почв. Использовали средние значения: для песчаной фракции ε' = 4,86, ε'' = 0,1, и ε' = 8.65, ε'' = 0,3 – для глинистой. Измеряя сухие почвы резонаторным методом и применяя формулу диэлектрической смеси, нашли долю глины (рис. 2*б*). Этот метод менее трудоемок и позволяет измерять засоленные почвы, так как небольшая массовая доля сухих солей практически не влияет на диэлектрическую проницаемость.

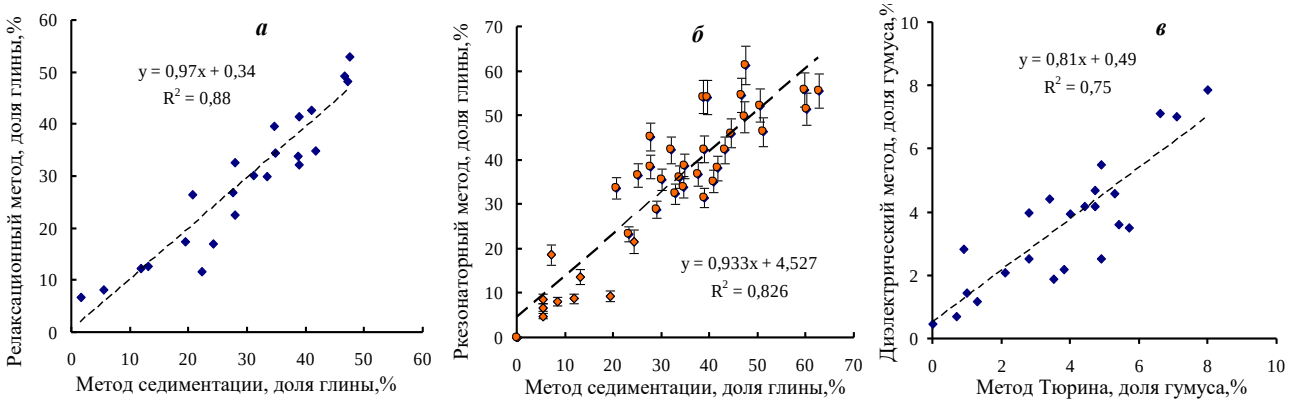


Рис. 2. *Сопоставление долей глины в почвах, найденных диэлектрическим методом, с данными традиционных методов анализа*

Для оценки содержания гумуса использовались значения максимально возможной доли связанной воды, найденные при моделировании высокочастотной части (2–8 ГГц) диэлектрических спектров. Известно, что этот параметр зависит как от содержания глины, так и содержания гумуса. Было получено регрессионное уравнение для оценки содержания гумуса, в котором использовалась доля глины, найденная релаксационным методом. Результаты представлены на рис. 2*в*.

В сравнении с релаксационным методом резонаторный метод обладает рядом преимуществ: меньшая трудоемкость, более высокая точность определения ε' и ε''сухих почв, простая пробоподготовка, возможность исследования засоленных почв, простота изготовления экспериментальной установки и возможность применения недорогих измерительных приборов.

А. С. Воробьев, К. А. Трушкин
АО «МЦСТ», г. Москва, Российская Федерация

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ПЛАТФОРМА «ЭЛЬБРУС» ДЛЯ ЗАДАЧ ЦОС И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ МИКРОПРОЦЕССОРОВ

Аннотация. Разработка и применение микропроцессоров «Эльбрус». Требования к топологическому проектированию подложек микропроцессора и возможности отечественных производств.
Ключевые слова*:* топологическое проектирование, подложка, корпус, микропроцессор «Эльбрус», BGA – ball grid array.
Для цитирования*:* Воробьев А. С., Трушкин К. А. Микропроцессорная платформа «Эльбрус» для задач ЦОС и численного моделирования. Аспекты проектирования подложек для высокопроизводительных микропроцессоров. // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. S. Vorobiev, K. A. Trushkin
JSC MCST, Moscow, Russian Federation

"ELBRUS" MICROPROCESSOR PLATFORM FOR DSP AND NUMERICAL MODELING TASKS. DESIGN ASPECTS OF SUBSTRATES FOR HIGH-PERFORMANCE MICROPROCESSORS

Annotation. *Development and application of Elbrus microprocessors.* Requirements for the layout design of microprocessor substrates and the capabilities of domestic manufacturing facilities.
Keywords*:* topological design, substrate, package, high-performance microprocessor, BGA (ball grid array).
For citation*:* Vorobiev A.S., Trushkin K. A. "Elbrus" microprocessor platform for DSP and numerical modeling tasks. Design aspects of substrates for high-performance microprocessors // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

АО «МЦСТ» разрабатывает и производит линейку микропроцессоров Эльбрус различного применения: от встраиваемой и мобильной вычислительной техники до высокопроизводительных серверов. В основе процессоров Эльбрус лежит оригинальная архитектура системы команд (ISA), разработанная в России, а также российская реализация логических схем ядра, кэш-памяти, контроллеров памяти и т.д. Архитектура Эльбрус построена на принципах широкого командного слова (VLIW) и способна выполнять на каждом ядре до 25 скалярных операций в такт и до 48 векторных операций в такт (FP32). Для процессоров Эльбрус разработан полноценный набор разработчика ПО (SDK), высокопроизводительные библиотеки, драйверы и фреймворки для решения задач ИИ.

Подход VLIW традиционно хорошо показывает себя при разработке специализированных процессоров цифровой обработки сигналов (ЦОС). Проведённые измерения производительности на нескольких типовых задачах показывают достаточно высокий архитектурный уровень производительности ядер Эльбрус.

Работа систем ЦОС часто требует работы в режиме реального времени. Для платформы Эльбрус имеются ОСРВ семейств Linux и QNX – российские ОС Эльбрус Линукс и ОСРВ «Нейтрино». При достаточной оптимизации ОС, процессоры Эльбрус показывают

задержки на уровне зарубежных массовых процессоров RockChip. Для применения процессоров Эльбрус, в АО «МЦСТ» и партнёрами разработаны материнские платы с форм-факторами COM Express, miniITX, microATX, ATX, EATX, SWTX, в том числе в 2- и 4-процессорных вариантах, лежащие в основе типоряда конечной продукции (встраиваемых компьютеров, персональных компьютеров, серверов). Производство и монтаж материнских плат освоены (в том числе) на российских предприятиях. Для конечной продукции также разработаны и используются российские корпуса и блоки питания.

С целью достижения технологической независимости при производстве этой вычислительной техники, необходимо углублять локализацию технологических операций на территории России. Одним из ключевых этапов производственного цикла является производство подложек и монтаж кристаллов процессоров на подложки.

Сложность реализации подложки корпуса для высокопроизводительных микропроцессоров постоянно растет. Это обусловлено увеличением потребляемой мощности, площади подложки корпуса и большим количеством периферии кристалла. Одновременно с этим уменьшаются технологические процессы изготовления кристалла, что приводит к уменьшению шага между выводами кристалла, а также к уменьшению габаритных размеров кристалла. Текущая тенденция показывает увеличение количества высокоскоростных интерфейсов в кристалле, что приводит к большой плотности интерфейсов в матрице кристалла с шагом выводов от 150 мкм. Зачастую габаритные размеры кристалла определяются количеством периферийных интерфейсов, а все остальное пространство занимает питание.

Мировая практика показывает, что основной технологией для изготовления подложек микропроцессоров является Build-up layers с тонкими диэлектрическими слоями с медной металлизацией, которые попарно добавляются к центральному слою жесткости. Аналогичных технологий изготовления подложек на территории Российской Федерации не существует. Однако, существуют российские компании, которые работают в этом направлении и осуществляют разработку эффективных технологий, которые в будущем должны позволить изготавливать гибридные подложки с возможностью установки кристаллов по технологии flip-chip с шагом выводов от 150 мкм.

Топологическое проектирование современных микропроцессоров с высокоскоростными интерфейсами требуют большого количества слоев, так как высокоскоростные сигналы требуется сопровождать на смежных слоях опорными полигонами (землей или питанием). Опорные полигоны земли/питания представляют собой сплошные заливки металлом шириной от 100 мкм до десятков миллиметров. Матрица кристалла представляет собой массив выводов с шагом выводов от 150-220 мкм. Зачастую количество выводов кристалла варьируется от 7 000 до 20 000 выводов. Исходя из количества выводов кристалла и шага между ними есть жесткие требования к переходным отверстиям, так как практически каждый вывод необходимо подключать к слоям подложки через переходные отверстия и иметь возможность располагать от 3 до 5 отверстий друг над другом. При таком большом количестве выводов кристалла с минимальным шагом необходимо иметь возможность между отверстиями проводить линии связи и зачастую не менее двух, а на слоях питания должны оставаться медные дорожки для прохождения тока между ними. Из-за высокой плотности выводов кристалла требуется при выходе из-под кристалла использовать проводники шириной от 12-15 мкм с зазором между ними от 12-15 мкм. Разрабатываемые технологии должны позволять располагать проводники на смежных слоях друг над другом и иметь поверхность подложки, позволяющей устанавливать кристалл по технологии flip-chip.

Исходя из вышеизложенных данных требуется на территории Российской Федерации разработать технологии, позволяющие проектировать и изготавливать подложки микропроцессоров с высокоплотными кристаллами и шагом выводов кристалла от 150 мкм с учетом особенностей топологического проектирования.

Ю. Н. Вольхин
АО «Центральное конструкторское бюро автоматики, Омск, Российская Федерация

О НЕКОТОРЫХ КЛЮЧЕВЫХ ПРОБЛЕМАХ В ОБЛАСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ РАДИОФОТОНИКИ (MICROWAVE PHOTONICS)

Аннотация. Показано, что радиофотоника как самостоятельное научно-техническое направление сформировалась в процессе создания высокоскоростных (широкополосных) волоконно-оптических линий связи со скоростью передачи данных до 1 Гб/с и выше. При этом ключевым «маркером» радиофотоники является модуляция фотонного сигнала ближнего или среднего инфракрасного диапазона высокочастотным сигналом СВЧ. Показано, что одной из ключевых проблем отечественной радиофотоники является отсутствие требуемых электрооптических модуляторов, например модуляторов Маха-Цендера с субвольтовыми полуволновыми напряжениями. Утверждается, что наиболее реальным решением этой проблемы является использование тонкоплёночного ниобата лития.
***Ключевые слова**:* радиофотоника, микроволновая фотоника, радиофотонный тракт, волоконно-оптическая линия связи, модулятор Маха-Цендера, тонкоплёночный ниобат лития, радиоэлектронное средство, вооружения, военная и специальная техника.
***Для цитирования**:* Вольхин Ю. Н. О некоторых ключевых проблемах в области отечественной радиофотоники (Microwave Photonics) // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

Yu. N. Volkhin
JSC "Central Design Bureau of Automatics", Omsk, Russian Federation

ON SOME KEY PROBLEMS IN THE DOMESTIC MICROWAVE PHOTONICS

Abstract. It is shown that photonics emerged as independent scientific and technical branch during the development of high-rate (broadband) fiber-optic communication links providing data transmission rates of 1 Gbps and above. A key characteristic of photonics is the modulation of a near- or mid-infrared optical signal by a high-frequency microwave signal. One of the major challenges facing the domestic photonics is the lack of necessary electro-optic modulators – i.e. Mach-Zehnder modulators with sub-volt half-wave voltages. The use of thin-film lithium niobate is proposed as the most viable solution to this problem.
Keywords: radio-photonics, microwave photonics, radio-photonic link, fiber-optic communication line, Mach-Zehnder modulator, thin-film lithium niobate, radio-electronic equipment, armaments, military and special-purpose equipment.
For citation: Volkhin Yu. N. On some key problems in the domestic microwave photonics // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Для лучшего понимания сути ключевых проблем в области отечественной радиофотоники необходимо заглянуть в прошлое и ответить на вопрос: *что привело к появлению этого научно-технического направления?* По мнению автора данных тезисов, радиофотоника является одним из продуктов процесса создания цифровых волоконно-оптических линий связи (далее ВОЛС). И появился этот «продукт» около 30 лет назад, когда

«чистая» скорость передачи информации по цифровым ВОЛС без каких-либо спектральных и пространственных уплотнений стала приближаться к 1 Гб/с. Если *не заострять внимание на некоторых «избыточных» деталях и нюансах* и ограничиться случаем простейшей амплитудной модуляции, то для достижения таких скоростей передачи информации по цифровым ВОЛС надо было передавать 1 миллиард импульсов в секунду - или один импульс в одну наносекунду. При такой скорости передачи информации по физической «сердцевине» цифровой ВОЛС – радиофотонному тракту (далее – РФТ, см. рисунок) – было необходимо обеспечить возможность передачи до 1 миллиарда импульсов в секунду с длительностью не более 0,3 нс и, как следствие, со спектральными составляющими в диапазоне СВЧ.

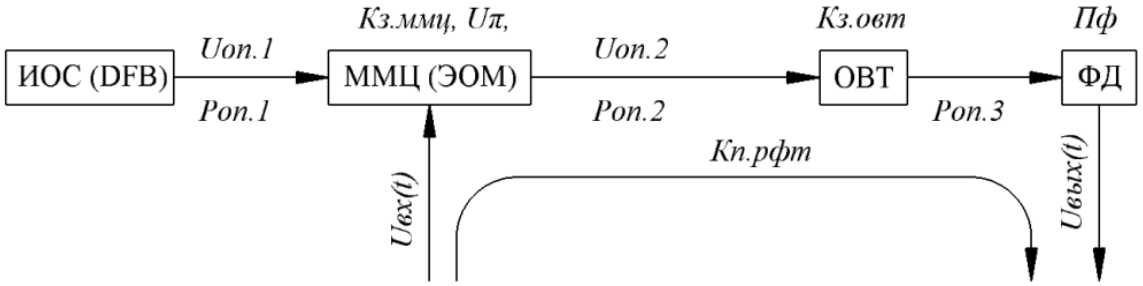


Схема структурная радиофотонного тракта

Поэтому подавать модулирующие импульсы на электрический вход электрооптического модулятора (далее ЭОМ), как правило, в виде модулятора Маха-Цендера (далее – ММЦ) и снимать продетектированные импульсы с электрического выхода фотодетектора (далее ФД) можно было уже только с использованием регулярных линий передачи практически, безальтернативно, коаксиальных. Да и управляющие электроды ММЦ и выходные электроды ФД должны были иметь строго определённую форму и размеры, а также строго определённое позиционирование друг относительно друга. Или, другими словами, эти электроды должны были принимать форму тех или иных, как правило, полосковых линий передачи СВЧ, причём, со строго определённым волновым сопротивлением.

Для проектирования таких устройств потребовались инженеры-исследователи и инженеры-проектировщики, которые имели компетенции и в области радиотехники СВЧ, и в области физики твёрдого тела, и в области оптоэлектроники-электрооптики или, говоря современным языком, фотоники. Или, другими словами, должна была появиться принципиально новая инженерная специальность.

Однако, прежде чем приступить к «инженерному» этапу работ, требовалось выполнить серию очень специфических научно-исследовательских работ, некоторые из них на уровне прикладной науки: по созданию многих новых технологий, по определению оптимального вида СВЧ фотодиодов для СВЧ ФД и особенно по изучению взаимодействия бегущих электромагнитных волн оптического и СВЧ диапазона.

Таким образом, при реализации цифровых ВОЛС со скоростью передачи информации 1 Гб/с возникло множество принципиально новых проблем, с которыми ранее не сталкивались ни учёные, ни инженеры. И вот для решения этих проблем пришлось создавать новую научно-техническую дисциплину, которую, чуть позднее, в англоязычной литературе стали называть микроволновой фотоникой (Microwave Photonic), а у нас – радиофотоникой. При этом ключевым маркером радиофотоники является процедура модуляции оптического, а точнее, фотонного сигнала ближнего или среднего инфракрасного диапазона высокочастотным электрическим сигналом дециметрового, сантиметрового или миллиметрового диапазона длин волн, или СВЧ сигналом в «широком» понимании этого термина.

Таким образом, радиофотоника как самостоятельное научно-техническое направление в виде одного из разделов техники СВЧ сформировалась, развивалась и продолжает развиваться по большей части в процессе создания высокоскоростных или широкополосных цифровых ВОЛС. И потому разработки источников оптического сигнала (далее – ИОС, см. рисунок), как правило, в виде лазеров с распределённой обратной связью или distributed feedback laser (далее DFB, см. рисунок), ЭОМ, как правило, в виде сегнетоэлектрических ММЦ, оптоволоконных трактов (далее – ОВТ, см. рисунок) и ФД, а также сопутствующих этим разработкам технологий и метрологии велись и будут вестись в подавляющем большинстве случаев в интересах цифровых ВОЛС. Так было, так есть и так будет.

И это создавало и продолжает создавать проблемы при использовании методов и средств радиофотоники при реализации РФТ из состава аналоговых радиоэлектронных средств (далее – РЭС) для вооружений, военной и специальной техники (далее – ВВСТ). И если с использованием ОВТ и ФД, как правило, проблем не возникает, то подавляющее большинство моделей ИОС и ММЦ, разработанных для реализации РФТ из состава цифровых ВОЛС, для реализации РФТ из состава аналоговых РЭС для ВВСТ абсолютно не годится. Дело в том, что по РФТ из состава цифровых ВОЛС передаются относительно мощные сигналы и потому величина коэффициента шума таких РФТ (далее – Кш.рфт) не является особо критичной. И, как следствие, не являются критичными величины полуволнового напряжения ММЦ (далее – Uπ) и основного шумового параметра ИОС - шума относительной интенсивности, или Relative Intensity Noise (далее – RIN), которые в основном и определяют величину Кш.рфт. А вот по РФТ из состава аналоговых РЭС для ВВСТ, как правило, передаются относительно слабые сигналы, и потому Кш.рфт становится крайне актуальным. И, как следствие, ужесточаются требования и к Uπ, которое желательно иметь не выше 1 В, и к RIN, который не должен превышать минус 160 дБ/Гц при отстройке от несущей до 1 ГГц. И, кстати говоря, отсутствие ММЦ с требуемыми субвольтовыми Uπ в настоящий момент является основным сдерживающим фактором, из-за которого методы и средства радиофтоники так и не получили широкого распространения в отечественных аналоговых РЭС для ВВСТ.

Однако сейчас ситуация в корне изменилась из-за бурного развития технологий искусственного интеллекта. Для эффективного использования последних потребовалось резкое увеличение скорости передачи информации по цифровым ВОЛС, которыми соединяются между собой центры обработки данных, а также повышение энергоэффективности этих ВОЛС. В данный момент речь идёт о «стабильных» 800 Гб/с и ~ 10–20 пДж/бит. А для получения таких значений скорости передачи информации и энергоэффективности, в числе прочего, пришлось найти и способы снижения Uπ ММЦ до субвольтовых значений. И потому можно ожидать, что ММЦ, которые уже разработаны и будут разработаны в ближайшее время для РФТ из состава цифровых ВОЛС, можно будет успешно использовать и в РФТ из состава аналоговых РЭС для ВВСТ.

При этом с большой долей уверенности можно констатировать следующее: получить субвольтовые значения Uπ в условиях нынешнего положения дел в «профильных» областях отечественной науки и техники можно лишь при реализации ММЦ на т.н. тонкоплёночном ниобате лития, или thin-film lithium niobate (далее – TFLN). Поэтому разработки отечественных ММЦ на TFLN должны получить широкую и действенную поддержку со стороны тех радиоинженеров и организаций, которые занимаются разработками РФТ и из состава аналоговых РЭС для ВВСТ, и из состава цифровых ВОЛС.

ФИЗИКА ИЗЛУЧЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН, ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ

А. А. Аверин[1], В. Ю. Ким[1], В. П. Полиматиди[1], В. И. Сахтеров[2,3]
[1]Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Российская Федерация
[2]Институт прикладной геофизики им. акад. Е. К. Федорова Москва, Российская Федерация
[3]ООО «НПО РГР», Москва, Троицк, Российская Федерация

АНТЕННА ВЕРТИКАЛЬНОГО И НАКЛОННОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Аннотация. Стандартное радиозондирование ионосферы осуществляется в 15-минутном режиме, при этом с сокращением времени зондирования с 30–40 секунд до 1–6 секунд есть тенденция перехода на 5-минутное зондирование. Для радиозондирования ионосферы применяются штатные антенны зенитного излучения типа «Ромб». На ее основе была предложена антенна «двойная Дельта» позволяющая проводить наклонное радиозондирование. В данном докладе представлены результаты схемы коммутации для проведения вертикального и наклонного радиозондирования с дополнительными решениями для грозозащиты от молний.
***Ключевые слова**:* ионозонд «Парус-А», вертикальное радиозондирование, антенна, наклонное радиозондирование.
***Для цитирования**:* Аверин А. А., Ким В. Ю., Полиматиди В. П., Сахтеров В. И. Антенна вертикального и наклонного радиозондирования ионосферы // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. A. Averin[1], V. Yu. Kim[1], V. P. Polimatidi[1], V. I. Sakhterov[2,3]
[1]Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences**,** Moscow, Troitsk, Russian Federation
[2]Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russian Federation
[3]RL RGR LLC, Moscow, Troitsk, Russian Federation

ANTENNA FOR VERTICAL AND INCLINED RADIO SOUNDING OF THE IONOSPHERE

Abstract. Standard ionospheric radiosonde measurements are performed in 15-minute intervals, although with the reduction of sounding time from 30–40 seconds to 1–6 seconds, there is a trend toward switching to 5-minute intervals. Standard "Rhombus" zenith antennas are used for ionospheric radiosonde measurements. Based on this antenna, a "double Delta" antenna was proposed for oblique radiosonde measurements. This paper presents the results of a switching circuit for vertical and oblique radiosonde measurements, along with additional lightning protection solutions.
***Keywords**:* Parus-A ionosonde, vertical radio sounding, antenna, oblique radio sounding.
***For citation**:* Averin A. A., Kim V. Yu., Polimatidi V. P., Sakhterov V. I. Antenna for vertical and inclined radio sounding of the ionosphere // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Ранее проводились эксперименты по наклонному радиозондированию между ионосферными станциями сети Росгидромет с использованием штатных антенн ионозондов. Полученные результаты показали возможность использования их для наклонного зондирования с ограничениями, при наклонной трассе необходимо зондирование до 35 МГц. Одновременно велись работы эксперименты по модернизации антенн типа «Ромб» заключающей удлинении длины вибраторов в пределах существующих геометрических размеров, при вертикальном радиозондировании были получены результаты по фиксации бокового ракурсного рассеяния над станцией нагревного стенда «Сура», расстояние более 500 км. Результаты были доложены на конференциях «РРВ-29» и «РГР-2025» и опубликованы в журнале «Гелиогеофизические исследования».

По ее идеологии была изготовлена антенна для вертикального и наклонного радиозондирования на основе антенны «Дельта» - двойная «Дельта», позволяющая получать отражения от ионосферы с более низких частот. Но для переключения с наклонного на вертикальное зондирование приходилось производить ручную коммутацию. В этой работе приводиться схема коммутации и одновременно дополняется коммутатором для защиты от молний во время нерабочего времени.

Блок коммутации располагается вблизи антенны и производится до согласующих трансформаторов. Антенна «Дельта имеет сопротивление 600 Ом располагающийся на вершине мачты, антенна двойная «Дельта имеет два отдельных вибратора и согласующие сопротивления по 300 Ом заземляются на боковых стойках. При вертикальном зондировании используются оба вибратора — необходимо согласующее устройство от 600 Ом антенны к 50 Ом фидера для соединения со станцией. При наклонном зондировании используется один вибратор— необходимо согласующее устройство от 300 к 50 Ом. В связи коммутацией в области вибраторов до трансформаторов используются контакторы для управления электропитания установок, нормально замкнутые для замыкания вибраторов на грунт, нормально открытые для подключения станции. Питание контакторов осуществляется по радиочастотным кабелям постоянным напряжение 24 В и разделением постоянного и высокочастотных напряжений индуктивностями. Места соединений вибраторов и грозозащиты разнесены.

В результате в нерабочее время вибраторы антенны при отсутствии напряжения от станции подсоединены к заземлению грозозащиты. По подаче соответствующего напряжения подключаются либо зенитное, либо наклонное направление излучения/приема антенны. Схема приведена на рисунке.

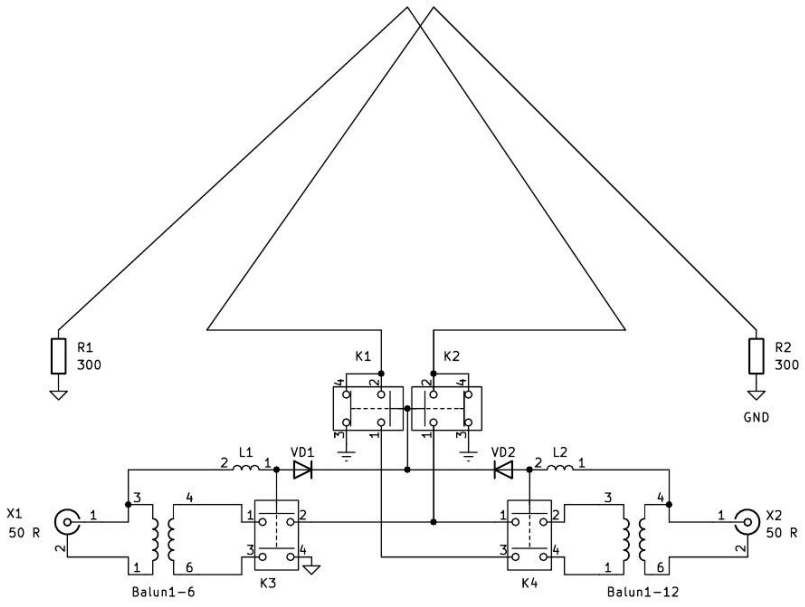


Схема коммутации и грозозащиты антенны двойная «Дельта»

Заключение

Приведена разрабатываемая компактная антенна для вертикального и наклонного радиозондирования ионосферы обладающая более низкой частоты приема отраженных сигналов с возможностью дистанционной коммутации вибраторов и отключением станции в не рабочее время, что снижает вероятность выхода из строя от молний.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИЗМИРАН (тема № FFUM-2026-0010).

Н. Е. Агарков[1,2], Ю. А. Костычов[2], К. А. Майненгер[1,2]
А. В. Бучельников[1,2], С. В. Кривальцевич[1,2]
[1]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТЕЛЮЩИХСЯ СИЛЬНО СВЯЗАННЫХ АНТЕНН КВ-УКВ ДИАПАЗОНА

Аннотация. Представлен обзор современных методов конструирования антенных систем (решеток). Отмечен метод на основе использования сильной электромагнитной связи между антенными элементами решетки, называемый методом токового слоя («current sheet»), который широко применяется в диапазонах УКВ и СВЧ. Поставлена задача адаптировать метод токового слоя для стелющихся антенн КВ-УКВ диапазона. Для этого в данном диапазоне проведены натурные измерения КСВ системы из двух стелющихся антенных элементов и коэффициента передачи между антенными элементами системы при различной степени их изоляции друг от друга за счет организации пространственного разнесения.
Ключевые слова: стелющиеся антенны, сильная связь между антеннами, токовый слой.
Для цитирования: Агарков Н. Е., Костычов Ю. А., Майненгер К. А., Бучельников А. В., Кривальцевич С. В. Исследование системы стелющихся сильно связанных антенн КВ-УКВ диапазона // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

N. E. Agarkov[1,2], Yu. A. Kostychov[2], K. A. Maynenger[1,2],
A. V. Buchelnikov[1,2], S. V. Krivaltsevich[1,2]
[1]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF A SYSTEM OF LOW-PROFILE, TIGHTLY COUPLED HF-VHF ANTENNAS

Abstract. This paper presents an overview of modern methods for designing antenna systems (arrays). Among these, the "current-sheet array" method based on tight electromagnetic coupling between array elements is widely used in the microwave range. The objective is to adapt the current-sheet array method for use with HF and VHF antennas mounted directly on the ground surface (near ground antennas). Field measurements were conducted on a system comprising two HF/VHF antenna elements, varying the isolation between them by adjusting their spatial separation.
Keywords: near ground antennas, tight coupling between antenna elements, current sheet, CSA.
For citation: Agarkov N. E., Kostychov Yu. A., Maynenger K. A., Buchelnikov A. V., Krivaltsevich S. V. Investigation of a system of low-profile, tightly coupled HF-VHF antennas // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Конструктивно современные широкополосные антенные решетки (системы антенных элементов) можно разделить на два типа: с сильно связанными и с изолированными антенными элементами.

Решетки с изолированными элементами характеризуются тем, что диапазон рабочих частот систем на их основе соответствует рабочему диапазону ее элементов. Построение систем данного типа основано на принципе существенного пространственного взаимного разнесения полноразмерных антенных элементов, которое обеспечивает необходимый уровень развязки (изоляции) между элементами. При высоком уровне изоляции решетки данного типа эффективно излучают и принимают электромагнитные волны. Снижение уровня изоляции между элементами влечет за собой ухудшение согласования в фидерном тракте системы и искажение ее диаграммы направленности. Поэтому для решеток на основе изолированных антенных элементов взаимное пространственное разнесение элементов должно быть сравнимо с длиной рабочей волны.

Решетки с сильно связанными элементами (выполненные по методу токового слоя) отличаются тем, что диапазон рабочих частот системы превышает диапазон рабочих частот ее элементов. Расширение рабочего диапазона решетки (относительно диапазона отдельного антенного элемента) приходится на низкочастотную область и вызвано высокими значениями коэффициента передачи между антенными элементами (сильной связью между ними). Зачастую излучатели соседних антенных элементов таких решеток имеют общие между собой конструктивные узлы, за счет которых и происходит достижение необходимого уровня коэффициента передачи (связи) между элементами. Антенные элементы решеток данного типа являются электрически малыми излучателями на нижних частотах рабочего диапазона системы.

Несмотря на то, что природа ограничений на нижние частоты рабочего диапазона систем с сильно связанными и с изолированными элементами принципиально отличается, ограничения на верхний частотный предел рабочего диапазона одинаковы для обоих типов решеток. Верхняя граница рабочего диапазона решеток обусловлена эффектом возникновения побочных максимумов в их диаграмме направленности. Данный эффект возникает при расстоянии между фазовыми центрами элементов, превышающем половину рабочей длины волны, на которой осуществляется радиосвязь.

Соответственно коэффициент перекрытия (отношение верхней частоты рабочего диапазона к нижней) решеток изолированных полноразмерных антенн ограничен примерно октавой (2:1). Нижняя граница рабочей частоты системы определяется размером антенных элементов (не менее четверти длины наибольшей рабочей волны), а верхняя – расстоянием между антеннами элементами (не более половины длины наименьшей рабочей волны).

Фазовые центры антенных элементов решеток, выполненных по методу токового слоя, находятся на расстояниях много меньших наибольшей длины волны рабочего диапазона, что позволяет многократно увеличить коэффициент перекрытия таких решеток. Например, известны конструкции систем данного типа, обеспечивающие рабочий диапазон от 2 до 18 ГГц (с перекрытием 9:1) и содержащие более 2000 антенных элементов, размещенных на площадке 0,55х0,55 м.

Очевидным недостатком метода токового слоя является большое число необходимых антенных элементов, а значит, и усложненная фидерная цепь. В диапазонах частот УКВ и СВЧ метод токового слоя широко распространен, но сведения о его использовании в КВ-УКВ диапазоне отсутствуют. Вероятно, это обусловлено большими размерами получающихся антенных систем при простом масштабировании решеток с сильно связанными элементами. Поэтому целью настоящей работы была проверка и демонстрация возможности адаптации метода токового слоя для системы КВ-УКВ диапазона.

В докладе приведены результаты исследования частотных характеристик системы из двух стелющихся сильно связанных малогабаритных пластинчатых антенн (рис. 1) для КВ-УКВ диапазона. Пластинчатые антенны размером 1,0х1,0 м с входным сопротивлением, близким к 100 Ом, были подключены параллельно между собой к одному порту векторного анализатора цепей.

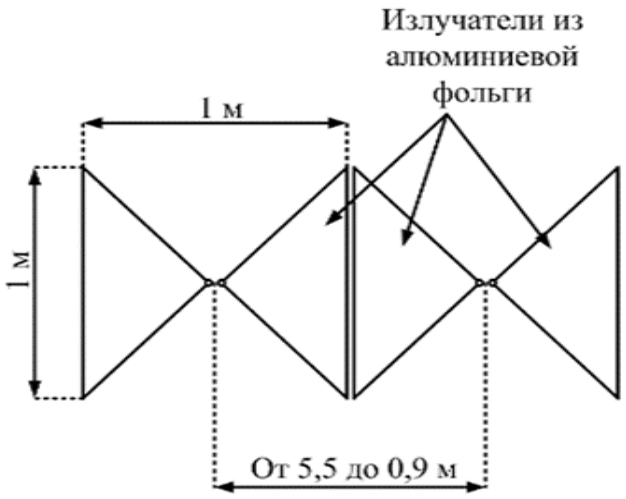


Рис. 1. *Схематичный вид системы пластинчатых стелющихся антенн*

В процессе измерений КСВ одиночного и связанных антенных элементов, а также коэффициента передачи между ними (в этом случае пластинчатые антенны подключались к раздельным портам векторного анализатора цепей), расстояние между их геометрическими центрами изменялось дискретно – 5,5; 2.5; 1,4; 1 и 0,9 м. Излучатели решетки из двух элементов располагались непосредственно на песке. Измерения частотных характеристик проводились попеременно с помощью портативных векторных анализаторов цепей – Sysjoint SV4401A и LibreVNA. Результаты проведенных измерений показаны на рис. 2.

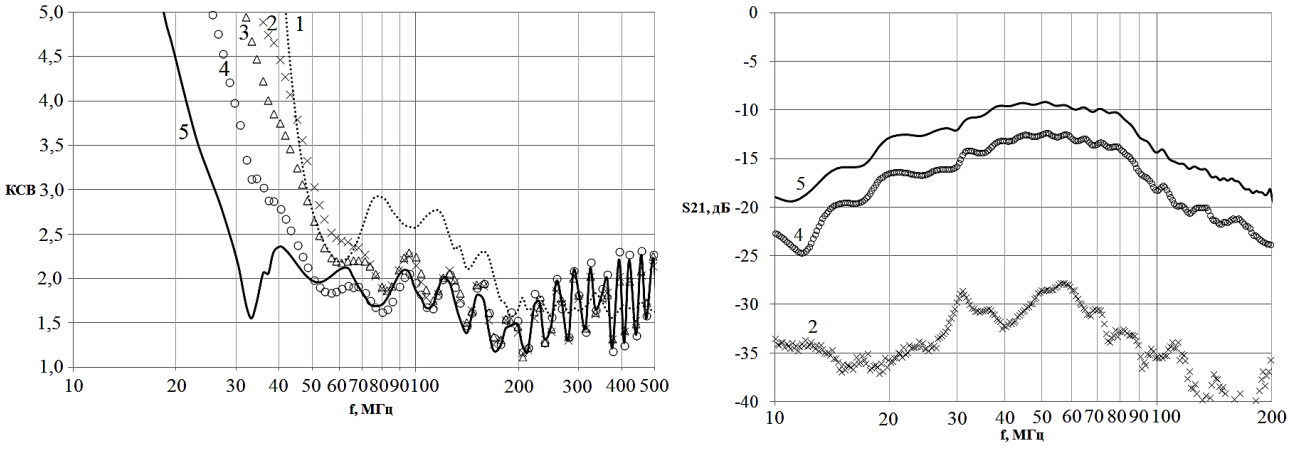


Рис. 2. *Частотная зависимость КСВ и коэффициента передачи между антенными элементами решетки при расстоянии между их центрами 2.5 м (2), 1.4 м (3), 1 м (4) и 0.9 м (5). (1) – КСВ одиночного стелющегося элемента*

Анализ результатов показывает эффективную работу метода токового слоя в КВ-УКВ диапазоне и для малого числа элементов решетки. По графикам на рис. 2 видно, что увеличение связи между элементами решетки (посредством их сближения и увеличения взаимной емкости) позволяет существенно расширить диапазон рабочих частот системы в область низких частот. Одиночный антенный элемент имеет нижнюю границу рабочего диапазона частот в 50 МГц (по уровню КСВ не более 3.0). Система из двух сильно связанных элементов имеет нижнюю частоту рабочего диапазона 26 МГц, при этом сохранено согласование в высокочастотной области.

Появление побочных максимумов диаграммы направленности для системы изолированных элементов, работающей с такой же нижней частоты, что и решетка сильно

связанных элементов (с 26 МГц), будет наблюдаться на частотах выше 40 МГц (рабочий диапазон частот составит от 26 до 40 МГц, коэффициент перекрытия 1,55), в то время как для системы сильно связанных элементов диаграмма направленности не претерпит существенных изменений вплоть до частоты 150 МГц (рабочий диапазон частот составит от 25 до 150 МГц, коэффициент перекрытия 5,75).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Омской области в рамках гранта РНФ № 26-12-20019.

М. М. Анишин[1], Л. П. Радио[2], К. В. Иванова[2], Л. А. Лубковская[2]
[1]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[2]Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

КОРРЕКЦИЯ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ IRI ПО ПАРАМЕТРАМ B_0 И B_1

Аннотация. Освещены результаты коррекции модели ионосферы IRI по ряду параметров. Проведен сравнительный анализ между рассчитанными высотно-частотными характеристиками ионосферы и экспериментальными данными вертикального зондирования до и после коррекции. Сделаны выводы относительно повышения точности численного моделирования ионограммы ионосферы.
Ключевые слова: ионосфера, ионозонд, ионограмма, высотно-частотная характеристика, вертикальное зондирование, ионосферные слои, параметры ионосферного слоя.
Для цитирования: Анишин М. М., Радио Л. П., Иванова К. В., Лубковская Л. А. Коррекция модели ионосферы IRI по параметрам B_0 и B_1 // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

M. M. Anishin[1], L. P. Radio[2], K. V. Ivanova[2], L. A. Lubkovskaya[2]
[1]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[2]Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

CORRECTION OF THE IRI IONOSPHERIC MODEL USING PARAMETERS B_0 AND B_1

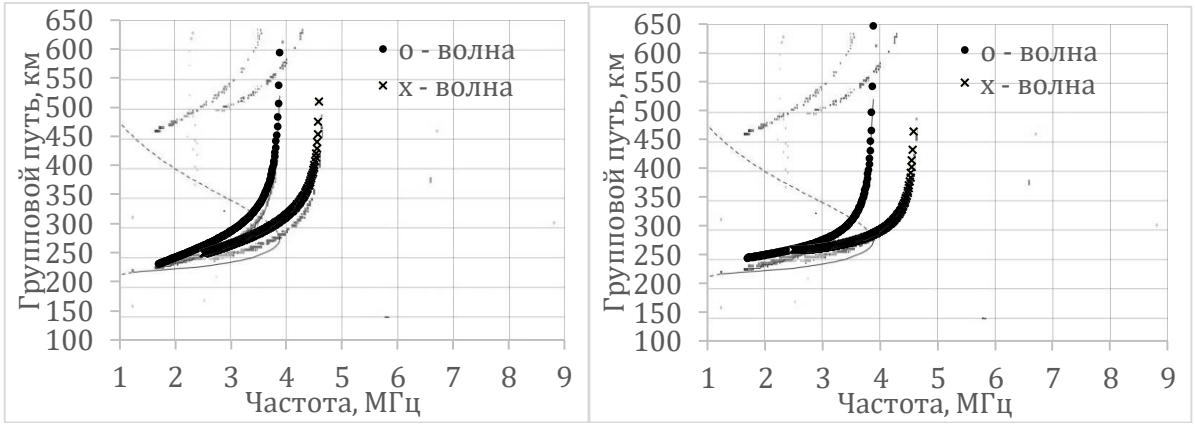
Abstract. This paper presents the results of correcting the IRI ionospheric model for a number of parameters. A comparative analysis is conducted between the calculated altitude-frequency characteristics of the ionosphere and experimental vertical sounding data before and after correction. Conclusions are drawn regarding improving the accuracy of numerical modeling of the ionosphere ionogram.
Keywords: ionosphere, ionosonde, ionogram, altitude-frequency characteristic, vertical sounding, ionospheric layers, ionospheric layer parameters.
For citation: Anishin M. M., Radio L. P., Ivanova K. V., Lubkovskaya L. A. Correction of the IRI ionospheric model using parameters B_0 and B_1 // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Модели ионосферы Земли являются составной частью компьютерных программ, обеспечивающих прогнозирование условий распространения радиоволн КВ диапазона для применения этих данных в системах управления радиосвязью, решения задач радиоконтроля, пеленгации источников радиоизлучений и др., учебных приложений, отображающих динамику физических процессов в ионосфере Земли. Международная справочная модель ионосферы IRI продолжает совершенствоваться, что определяет необходимость последующей модернизации программ, построенных с её использованием. При этом известно, что точность модельного описания трехмерного распределения электронной концентрации в ионосфере Земли может быть повышена за счет адаптации модели ионосферы по данным вертикального зондирования. В данной работе приводятся результаты коррекции модели по данным вертикального зондирования, ко-

торая позволяет привести выходные данные модели IRI в соответствие с реальной обстановкой и повысить точность прогнозирования характеристик каналов коротковолновой связи на интервале времени между моментами вертикального зондированиями ионосферы. В настоящее время автоматизация работ по обработке высотно-частотных характеристик вертикального зондирования позволила существенно упростить их выполнение. Встроенное программное обеспечение ионозондов обеспечивает отображение высотного профиля ионосферы и ряда ее параметров в табличном виде для текущего времени вертикального зондирования. Но, если ранее проблема метрологической точности и идентичности измерений, выполненных на различных станциях определялась только единством метрологических характеристик средств зондирования и человеческим фактором, то в настоящее время к этому добавились и несоответствия в методах и алгоритмах обработки ионосферных данных, применяемых ионозондами различных производителей.

В рамках данной работы использовались экспериментальные данные полученные широко применяемым техническим средством для зондирования ионосферы – ионозондом DPS-4. По данным текущей диагностики как правило в большинстве случаев в качестве основных параметров для коррекции высотного профиля модели ионосферы выступали, полученные с ионозонда значения критических частот и высот максимумов слоев E, F1 и F2. Современные ионозонды кроме указанных характеристик, также выдают дополнительные параметры: B_0 – толщина нижней части слоя F2 и B_1 – задающий форму профиля в слое F2. Целью данной работы было провести оценку влияния данных параметров на точность прогноза характеристик ионосферы по модели IRI. В качестве оценки и определения ошибки прогноза состояния ионосферы использовалось средние отклонение между построенной высотно-частной характеристикой в результате численного моделирования на основе решения волновых уравнений для высотного профиля модели ионосферы IRI и экспериментальными значениями той же характеристики, полученной ионозондом. Все сравнения проводились по измеренным ионограммам на московской ионосферной станции (координаты станции: 55.47 С.Ш., 37.31 В.Д.). Отобранные для анализа сеансы зондирования проводились в различные сезоны, время суток и при разной солнечной активности. Рассматривались два случая коррекции модели ионосферы. Первый по основным параметрам критические частоты и высоты максимумов ионосферных слоев и второй с дополнительным учетом адаптации высотного профиля ионосферы по параметрам B_0 и B_1.

В качестве одного из примеров сравнения на рисунке представлены высотно-частные характеристики для обеих компонент (обыкновенная о-волна и необыкновенная х-волна), полученные в результате вычислительного эксперимента отображенных на фоне картинки экспериментальной ионограммы вертикального зондирования.



Высотно-частотные характеристики по результатам моделирования и эксперимента

На рисунке слева отображен рисунок характеристики с коррекцией только по критическим частотам и высотам слоев ионосферы, а справа – картинка с дополнительной коррекцией по параметрам B_0 и B_1.

На основе проведенных расчетов можно сделать следующие выводы. В большинстве случаев дополнительная коррекция по параметрам B_0 и B_1 повышала точность расчета высотно-частной характеристики. В среднем суммарная ошибка по отклонению между высотно-частотными характеристиками по эксперименту и при численном моделировании сокращалась на 3–16 км или от 7 до 55%. Однако необходимо отметить, что в ряде случаев, когда отклонения составляли небольшие значения до 10 км дополнительная коррекция приводила наоборот к понижению точности расчета на 3–5 км в абсолютных значениях или порядка 20-30%. Эти результаты указывают на то, что алгоритмы, заложенные в программное обеспечение ионозонда для определения параметров ионосферы, не являются достаточно эффективными в определенных условиях, что в итоге при коррекции снижает точность проводимого моделирования.

В. П. Беличенко, Т. И. Чурикова
Национальный исследовательский Томский государственный университет
Томск, Российская Федерация

МЕТОДЫ РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕРЕДАЮЩЕЙ КРУГЛОЙ РАМОЧНОЙ АНТЕННЫ

Аннотация. Проанализированы возможные методы формирования круговой поляризации излучения передающей круглой рамочной антенны, основанные на снятии вырождения низкочастотной пары её характеристических мод, за счет включения в антенну двух реактивных нагрузок. В случае применения нагрузок индуктивного характера это приводит к расширению относительной полосы рабочих частот антенны по коэффициенту эллиптичности. Показано, что два разрыва проводника антенны, выполняющие функции ёмкостных нагрузок, обеспечивают достижение близкого к единице коэффициента эллиптичности излучения с одновременным расширением относительной полосы рабочих частот.
Ключевые слова*:* рамочная антенна, круговая поляризация, теория характеристических мод, коэффициент эллиптичности.
Для цитирования*:* Беличенко В. П., Чурикова Т. И. Методика расширения функциональных возможностей передающей круглой рамочной антенны // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

V. P. Belichenko, T. I. Churikova
National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

METHODS FOR EXPANDING THE FUNCTIONAL CAPABILITIES OF A TRANSMITTING CIRCULAR LOOP ANTENNA

Abstract. The paper analyzes possible methods for generating circularly polarized radiation of transmitting circular loop antenna. These methods rely on lifting the degeneracy of the antenna's low-frequency pair of characteristic modes by incorporating two reactive loads. In the case of inductive loading, the relative operating frequency bandwidth of the antenna, defined in terms of the axial ratio, is broadened. It is shown that two gaps in the antenna conductor, acting as capacitive loads, enable the achievement of a radiation axial ratio close to unity while simultaneously broadening the relative operating frequency bandwidth.
Keywords*:* loop antenna, circular polarization, characteristic mode theory, axial ratio.
For citation*:* Belichenko V. P., Churikova T. I. Methods for expanding the functional capabilities of a transmitting circular loop antenna // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Введение

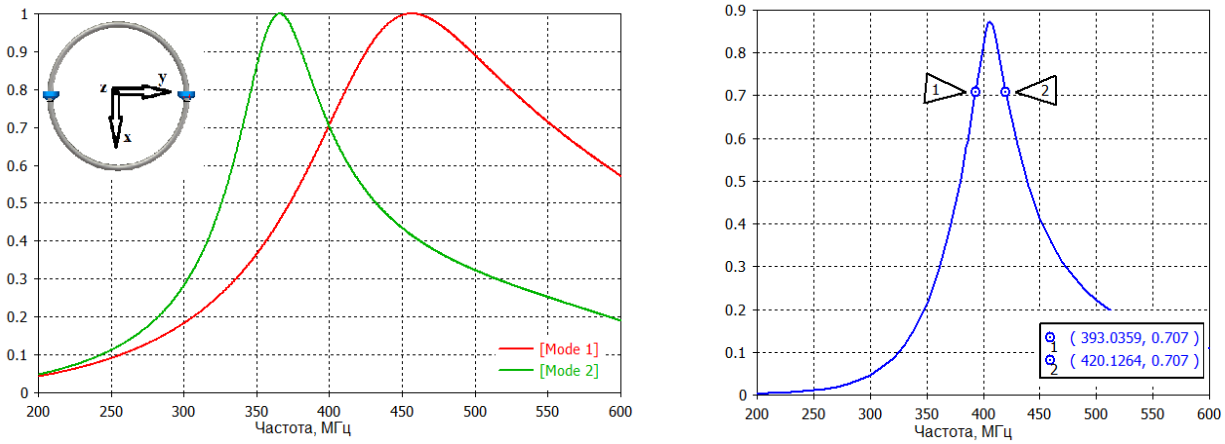
Рамочные антенны обычно имеют достаточно простой конструктив и могут быть адаптированы под различные диапазоны частот. Привлекательность рамочных антенн с круговой поляризацией излучения объясняется целым рядом функциональных преимуществ. Среди которых выделяются устойчивость к взаимной ориентации антенн, подавление отраженных сигналов, хорошая помехозащищенность. Поэтому исследование возможностей модификации традиционных рамочных антенн с линейной поляризацией излучения, с целью обеспечения ими круговой поляризации излучения, представляет вполне определенный интерес.

В данной работе для исследования методов расширения функциональных возможностей передающей круглой рамочной антенны применяется метод основанный на теории характеристических мод. Все расчеты выполнялись в программной среде CST Studio Suite.

Получение круговой поляризации излучения с использованием в антенне индуктивной нагрузки

Обычная круглая рамочная антенна, с периметром близким к рабочей длине волны, излучает поле линейной поляризации. Анализ на основе теории характеристических мод показывает, что две основные низкочастотные собственные моды подобной антенны имеют вырожденный характер. Поэтому, с принципиальной точки зрения, существует возможность получения круговой поляризации излучения путем должным образом осуществленного снятия вырождения этих мод. Для этого необходимо обеспечить: одинаковую эффективность возбуждения мод на некоторой рабочей частоте антенны, ортогональность полей излучения мод и разность фаз этих полей в 90°.

Один из возможных способов снятия вырождения мод и получения круговой поляризации излучения, описанный в литературе, подразумевает введение в конструкцию антенны две равные по величине индуктивные нагрузки в диаметрально противоположных точках рамки. Рассмотрим подобный подход подробнее. На рис. 1*а* приведены частотные зависимости модальных значимостей первых двух низкочастотных характеристических мод круглой рамочной антенны с двумя диаметрально противоположно расположенными индуктивными нагрузками. Диаметр рамки составляет 229 мм, индуктивное реактивное сопротивление каждой нагрузки снижено составляет 95 Ом, а радиус проводника антенны – 5 мм. Снятие вырождения осуществлено именно за счет введения указанных индуктивных нагрузок. Как видно, в данном случае модальные значимости мод оказываются равными на частоте 400 МГц. При этом расчет частотных зависимостей характеристических углов мод показал, что они отличаются на 90° на несколько другой частоте – 406 МГц. Этот факт должен был сказаться на результатах расчета коэффициента эллиптичности. Для его расчета к антенне был подключен источник возбуждения в точке, отстоящей на угловом расстоянии в 45° от оси OY. Выбор положения источника возбуждения в указанной точке продиктован равенством в ней плотностей распределений токов мод.



а *б*

Рис. 1. *Частотная зависимость модальных значимостей основных мод рамочной антенны круглой формы с двумя нагрузками (а), частотная зависимость коэффициента эллиптичности (б)*

Частотная зависимость коэффициента эллиптичности приведена на рис. 1*б*. Как и следовало ожидать, его наибольшее значение, равное 0,87, получено на частоте 406 МГц. При этом относительная полоса частот антенны по уровню 0,707 коэффициента эллиптичности составляет 6,7%.

Получение круговой поляризации излучения с использованием в антенне ёмкостной нагрузки

Разрыв проводника круглой рамочной антенны надлежащего размера (в сущности, введение в нее емкостной нагрузки) позволяет, в принципе, получить излучение круговой поляризации. Нами теоретически строго, в рамках теории характеристических мод, исследована круглая рамочная антенна с двумя диаметрально противоположно расположенными разрывами проводника, представленная на рис. 2*а*. Диаметр рамки по прежнему составляет 229 мм, радиус проводника – 7 мм, угловая ширина разрыва –1° (около 2 мм). Ширина разрыва была определена эмпирическим путем для получения уровня модальных значимостей мод не менее 0,707 на некоторой рабочей частоте и разности характеристических углов между модами в 90° на этой частоте. В данном случае, модальные значимости совпадают на частоте 576 МГц (рис. 2*а*). Поскольку основным критерием выбора положения источника возбуждения является равенство амплитуд двух мод, в данном случае источник также размешен на угловом расстоянии в 45° от оси OY. Как видно из рис. 2*б* коэффициент эллиптичности имеет наибольшее значение, равное 0,97, на частоте 560 МГц, относительная полоса частот по уровню 0,707 коэффициента эллиптичности составляет около 12%.

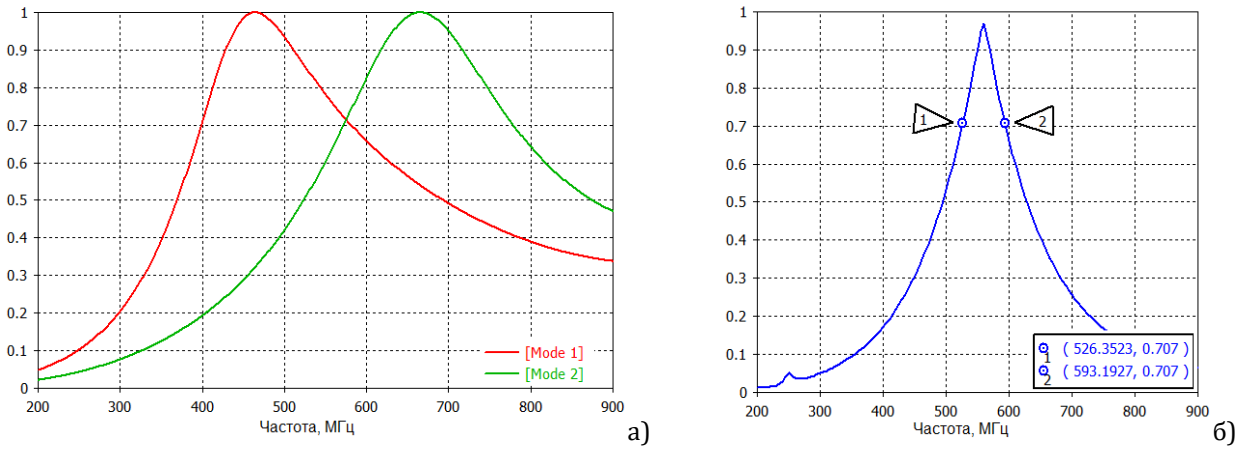


***Рис.* 2.** *Частотная зависимость модальных значимостей основных мод рамочной антенны круглой формы с двумя разрывами (а), частотная зависимость коэффициента эллиптичности (б)*

Заключение

В работе рассмотрены способы получения круговой поляризации излучения у круглой рамочной антенны путем снятия вырождения у низкочастотной пары характеристических мод антенны. В ходе исследования выяснено, что использование разрыва в контуре антенны в качестве ёмкостной нагрузки позволяет получить близкий к единице коэффициент эллиптичности в более широкой полосе частот.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации Программы «Учебного центра коллективного проектирования электронной компонентной базы для систем беспроводной связи» в Томском государственном университете.

С. А. Борисевич
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ F2-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КВ-РАДИОВОЛН, ОТ УРОВНЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ПЕРИОД 25-ГО ЦИКЛА

Аннотация. Представлены результаты анализа критической частоты foF2 слоя F2 и максимальной применяемой частоты MUF(3000)F2 для радиотрассы 3000 км по данным ионозонда JR055 Juliusruh за период с декабря 2019 г. по июль 2026 г. Для сопоставления с солнечной активностью использован наблюдаемый поток F10.7. Все параметры сведены по общей дате при временной привязке 20:00 UTC, общий объем выборки составил 2409 суточных наблюдений и 80 среднемесячных значений. Установлены выраженный сезонный ход параметров F2-слоя и многолетнее увеличение foF2 и MUF(3000)F2 на восходящей части 25-го солнечного цикла с наиболее высокими уровнями в 2023–2024 гг. Выявлена высокая взаимная корреляция параметров foF2 и MUF(3000)F2. Прямая связь параметров foF2 и MUF(3000)F2 с F10.7 выражена слабее, однако после исключения среднемесячной сезонной составляющей корреляция F10.7 с foF2 и MUF(3000)F2 становится более явной. Показано, что для оценки частотных условий КВ-распространения необходимо учитывать одновременно многолетнюю и сезонную изменчивость.
Ключевые слова: слой F2, foF2, MUF(3000)F2, F10.7, КВ-распространение, 25-й солнечный цикл.
Для цитирования: Борисевич С. А. Анализ зависимости параметров F2-слоя ионосферы, определяющих условия распространения КВ-радиоволн, от уровня солнечной активности в период 25-го цикла // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

S. A. Borisevich
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

EFFECTS OF SOLAR ACTIVITY LEVELS ON IONOSPHERIC F2-LAYER PARAMETERS DETERMINING HF RADIO WAVE PROPAGATION CONDITIONS DURING THE 25TH CYCLE

Abstract. This paper presents the results of analyzing the critical frequency of the F2 layer (foF2) and the maximum usable frequency for a 3,000 km radio path (MUF(3000)F2) using data from the JR055 Juliusruh ionosonde for the period from December 2019 to July 2026. The observed solar radio flux F10.7 was utilized to correlate the ionospheric data with solar activity. All analyzed parameters were synchronized by date at a time anchor of 20:00 UTC, yielding a total sample size of 2409 daily observations and 80 monthly mean values. The findings reveal a pronounced seasonal variation in the F2-layer parameters, alongside a long-term increase in foF2 and MUF(3000)F2 during the ascending phase of Solar Cycle 25, peaking in 2023–2024. A strong mutual correlation is observed between the foF2 and MUF(3000)F2 parameters. Although the direct correlation of foF2 and MUF(3000)F2 with F10.7 is weaker, removing the monthly mean seasonal component makes the correlation between F10.7 and both foF2 and MUF(3000)F2 more evident. Ultimately, it is demonstrated that evaluating HF propagation frequency conditions requires simultaneous consideration of both long-term and seasonal variability.
Keywords: F2 layer, foF2, MUF(3000)F2, F10.7, HF propagation, Solar Cycle 25.

***For citation**:* Borisevich S. A Effects of solar activity levels on ionospheric F2-layer parameters determining HF radio wave propagation conditions during the 25th cycle // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Распространение декаметровых радиоволн на трассах большой протяжённости в значительной мере зависит от состояния слоя F2 ионосферы. Для практического выбора рабочих частот существенное значение имеют критическая частота foF2 и максимальная используемая частота MUF. Первая характеризует состояние области максимума F2, тогда как MUF(3000)F2 (далее - MUF) позволяет оценить верхнюю частотную границу распространения для трассы 3000 км. В связи с этим представляет интерес оценить, как указанные параметры изменялись в зависимости от солнечной активности на протяжении рассматриваемого участка 25-го цикла.

Исходные данные и методика

Ионосферные данные получены из Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO/DIDBase) для станции JR055 Juliusruh (54,6° с.ш., 13,4° в.д., ионозонд DPS-4D). Период исследования: декабрь 2019 (соответствует началу 25-го солнечного цикла) - июль 2026 г. включительно.

Для каждого календарного дня исследуемого периода из рядов foF2, MUF и F10.7 выбирались значения, ближайшие по времени к 20:00 UTC. По полученным суточным данным рассчитывались арифметические среднемесячные значения параметров. Всего использовано 2409 общих суточных наблюдений для расчета 80 среднемесячных значений.

Результаты

Рис. 1 показывает две характерные особенности. Первая – выраженная повторяемость сезонной формы foF2 и MUF. Вторая – изменение общего уровня рядов от года к году: средний foF2 увеличился с 3,65 до 5,53 МГц, MUF – с 12,16 до 16,37 МГц, а F10.7 – с 73,8 до 191,2. Относительно 2020 г. прирост foF2 к 2024 г. составляет около 51 %, MUF – около 35 %. В 2025 г. все три показателя уменьшаются: foF2 до 5,05 МГц, MUF до 15,17 МГц, F10.7 до 155,1. На всём среднемесячном ряду foF2 и MUF изменяются практически синхронно; коэффициент корреляции составляет 0,993. Это закономерно, ведь MUF не является независимой от foF2 характеристикой и отражает состояние того же слоя F2. Для F10.7 прямая корреляция с исходными среднемесячными значениями foF2 и MUF заметно ниже. Следовательно, при анализе связи с F10.7 сезонную составляющую частотных параметров необходимо отделять от многолетней. В таблице приведены среднегодовые значения foF2, MUF и F10.7 только за полные календарные года 2020–2025.

Исходные среднемесячные значения foF2 и MUF характеризуются выраженной сезонной изменчивостью, которая маскирует их межгодовую связь с F10.7. Для наглядного сопоставления межгодовых изменений исходные значения на рисунке 2 сгруппированы по календарным месяцам. Для количественного исключения сезонной составляющей из каждого значения вычиталось среднее значение соответствующего календарного месяца за рассматриваемый период, таким образом корреляция F10.7 с foF2 и MUF составила 0,842 и 0,778 соответственно. После учёта регулярного сезонного хода сохраняется выраженная положительная связь межгодовых изменений солнечной активности с изменениями исследуемых параметров F2-слоя.

Исследование 25-го солнечного цикла показывает, что частотные возможности F2-распространения заметно меняются как между сезонами, так и между годами. В неблагоприятные зимние периоды среднемесячная MUF находится примерно в области 7–9 МГц, тогда как в наиболее благоприятные весенне-летние периоды достигает 18–22 МГц. Также необходимо учитывать не только текущий уровень солнечной активности, но и календарный месяц. Один и тот же уровень F10.7 не задаёт однозначное значение MUF для разных сезонов, более корректно сравнивать одинаковые месяцы.

Полученные результаты относятся к одной станции, фиксированной временной привязке и стандартизованной характеристике MUF для трассы 3000 км слоя F2. Поэтому их следует рассматривать только для оценки многолетних и сезонных тенденций, а не как прямой прогноз для произвольной трассы, другого времени суток или географической области.

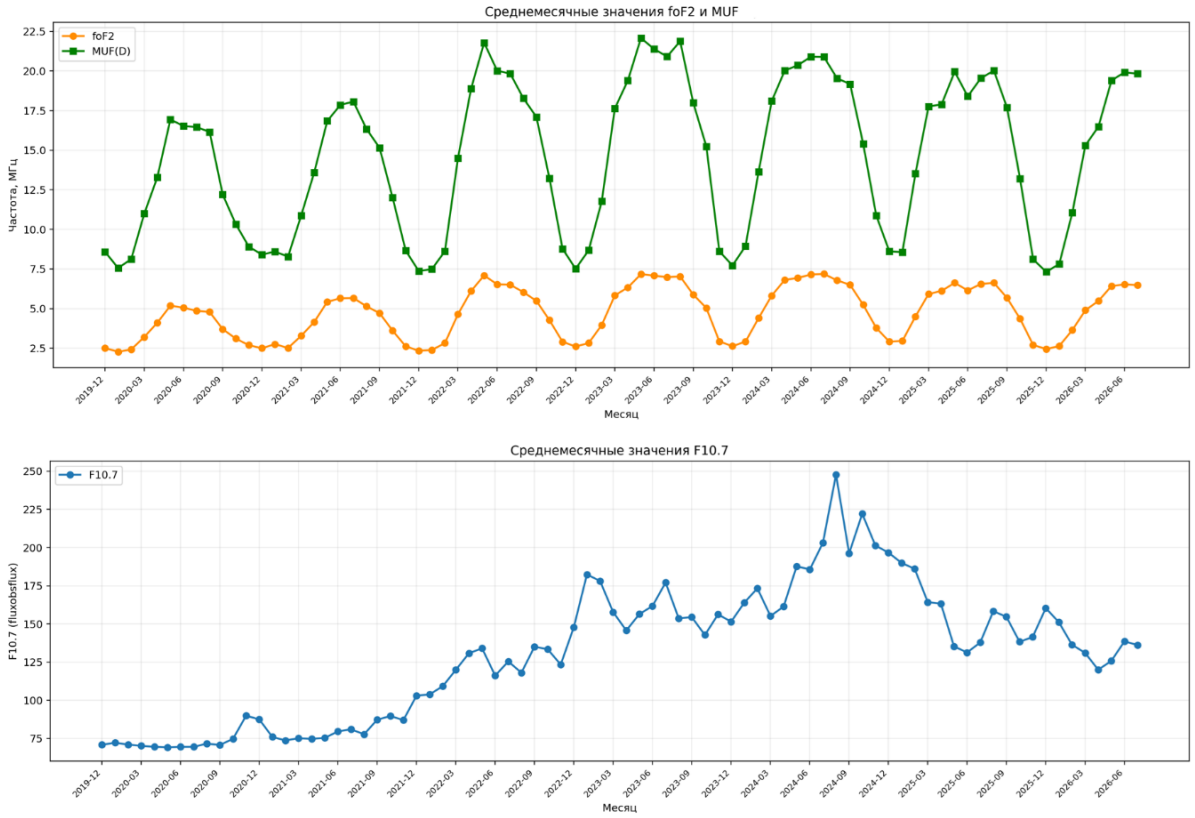


Рис. 1. *Среднемесячные значения foF2, MUF и F10.7*

Средние значения параметров за календарные годы 2020–2025

Год	N дней	foF2, МГц	MUF, МГц	F10.7, sfu
2020	362	3,65	12,16	73,8
2021	362	3,99	12,80	81,7
2022	364	4,78	14,67	124,8
2023	364	5,31	16,11	159,8
2024	364	5,53	16,38	191,2
2025	351	5,05	15,17	155,1

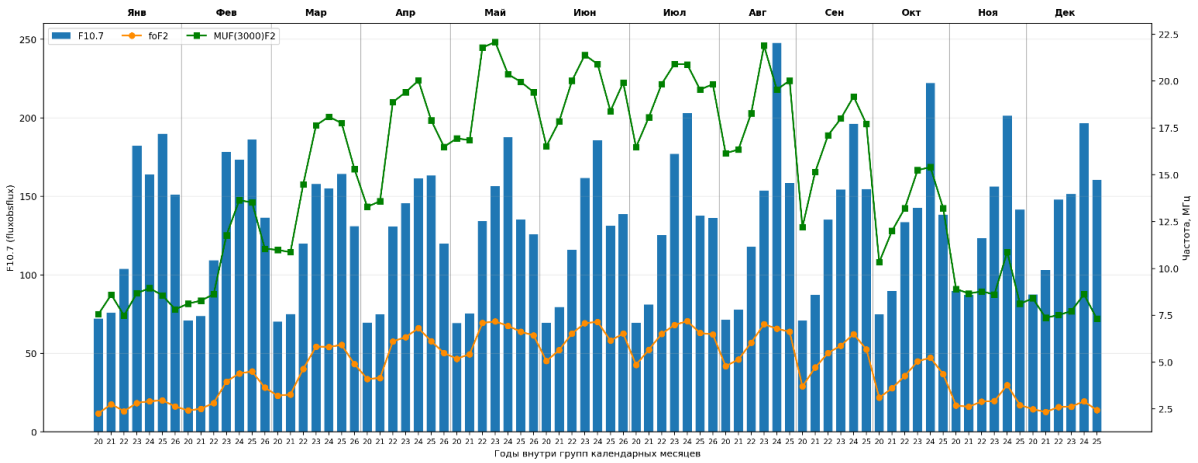


***Рис. 2**. Среднемесячные значения foF2, MUF и F10.7, сгруппированные по календарным месяцам для сопоставления межгодовых изменений*

Заключение

Сводные данные foF2 и MUF за декабрь 2019 г. – июль 2026 г. показывают выраженную согласованную многолетнюю и сезонную изменчивость. Среднегодовые уровни foF2, MUF и F10.7 возрастают от конца 2019 к 2023 гг. достигая максимума в 2024 г., после чего в 2025 г. снижаются. Прямая корреляция F10.7 с исходными среднемесячными рядами невысока, но сопоставление одинаковых календарных месяцев разных лет позволяет наглядно проследить связь межгодовых изменений F10.7 с изменениями параметров foF2, MUF без смешения разных сезонов. Полученные результаты подтверждают необходимость совместного учёта солнечной активности и сезонного состояния F2-слоя при долгосрочном планировании КВ-радиолиний.

М. А. Бузова[1,2], А. С. Круглов[2,3]
[1]Самарское инновационное предприятие радиосистем, Самара, Российская Федерация
[2]Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
Самара, Российская Федерация
[3]Научно-производственное объединение «Ангстрем»
Москва, Зеленоград, Российская Федерация

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАСС РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В АРЕАЛАХ РАБОТЫ РАДИОСТАНЦИЙ ОВЧ/УВЧ ДИАПАЗОНОВ

Аннотация. Особенности трасс распространения радиоволн ОВЧ/УВЧ диапазонов оказывают сильное влияние на характеристики радиосигналов в точке приема. Поэтому задача оценивания параметров трасс распространения радиоволн является актуальной. Проведен ряд расчетно-экспериментальных исследований основных параметров трасс распространения радиоволн в ареалах работы радиостанций. Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании вероятностей установления радиосвязи.
Ключевые слова: трассы распространения радиоволн, параметры, ОВЧ/УВЧ диапазоны.
Для цитирования: Бузова М. А., Круглов А. С. Расчетно-экспериментальные исследования основных параметров трасс распространения радиоволн в ареалах работы радиостанций ОВЧ/УВЧ диапазонов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

M. A. Buzova[1,2], A. S. Kruglov[2,3]
[1]Samara Innovative Business of Radio Systems, Samara, Russian Federation
[2]Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
Samara, Russian Federation
[3]Scientific and Production Association «Angstrem», Moscow, Zelenograd, Russian Federation

CALCULATION AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE MAIN PARAMETERS OF RADIO WAVE PROPAGATION PATHS IN THE OPERATING AREAS OF VHF/UHF RADIO STATIONS

Abstract. The characteristics of VHF/UHF radio wave propagation paths have a significant impact on the characteristics of radio signals at the receiving point. Therefore, the problem of estimating the parameters of radio wave propagation paths is relevant. This paper presents a series of computational and experimental studies of the key parameters of radio wave propagation paths in radio station operating areas. The results obtained can be used to predict the probabilities of establishing radio communications.
Keywords: radio wave propagation paths, parameters, VHF/UHF ranges.
For citation: Buzova M. A., Kruglov A. S. Calculation and experimental studies of the main parameters of radio wave propagation paths in the operating areas of VHF/UHF radio stations // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

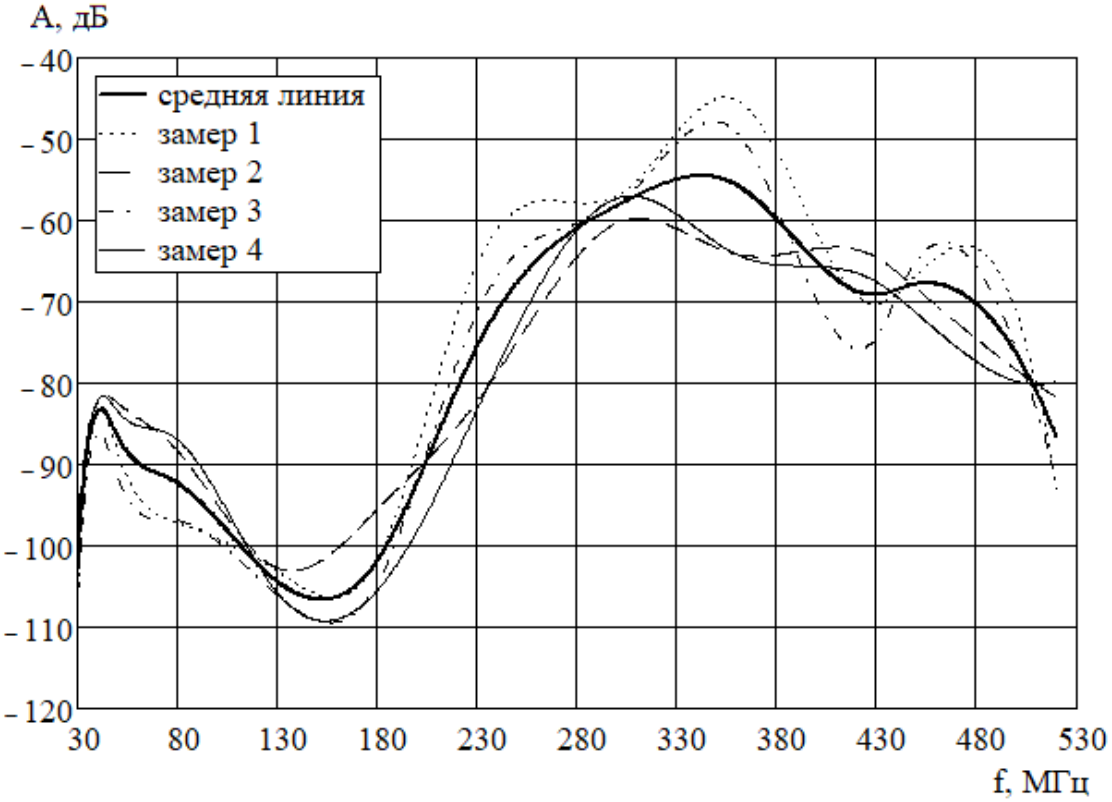
Хорошо известно, что свойства окружающей среды во многом определяют процесс распространения радиоволн из точки передачи в точку приема. При этом основные свойства среды, влияющие на процесс распространения, традиционно формализуются в

радиофизике как параметры трасс распространения радиоволн. Данный доклад посвящен расчетно-экспериментальному определению параметров трасс, наиболее сильно влияющих на характеристики сигналов в точке приема.

Исходя из практики эксплуатации систем подвижной радиосвязи, можно отметить, что на дальность радиосвязи влияет множество факторов, включая положение оператора, препятствия на местности (лес, застройка и т.п.), рельеф поверхности (низины, овраги и т.д.), время суток, время года, атмосферные явления, помеховая обстановка и проч. При этом для установления устойчивой радиосвязи должен быть выполнен критерий обеспечения конкретного заранее заданного в технической документации значения отношения сигнал/шум на входе приемного устройства. Например, у типовой радиостанции диапазонов ОВЧ/УВЧ это соотношение составляет около 6 дБ, а у современной радиостанции шестого поколения в зависимости от типа применяемой модуляции может достигать 1 дБ.

На сегодняшний день разработано весьма большое количество различного рода подходов и методик к оцениванию параметров трасс распространения и их влияния на характеристики сигнала в точке приема. Из всего разнообразия подходов авторами была выбрана расчетно-экспериментальная методика с использованием возимых сверхширокополосных ненаправленных антенн вертикальной поляризации с рабочим диапазоном частот от 30 до 520 МГц, позволяющая оценивать потери на трассах распространения сразу в широком диапазоне частот.

В рамках проводимых исследований оценивался ряд различных параметров трасс распространения разной длины с использованием сверхширокополосных антенн нескольких типов, а именно несимметричного вибраторного и симметричного вибраторного типа.



Частотные зависимости общих потерь на трассе распространения радиоволн в ареале работы радиостанции длиной 18,5 км

В качестве примера на рисунке представлены частотные зависимости общих потерь *A* на трассе распространения радиоволн в диапазоне частот от 30 МГц до 520 МГц.

Заметим, что данные результаты получены для типичной трассы распространения радиоволн в ареале работы радиостанции длиной 18,5 км с полуоткрытым интервалом прохождения. Кроме того, на графике представлены значения, полученные путем усреднения результатов нескольких серий измерений. Из представленных результатов видно, что для различных частот потери на трассе отличаются существенным образом, что необходимо учитывать на практике при организации работы систем подвижной радиосвязи.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы разработчиками систем подвижной радиосвязи при прогнозировании вероятностей установления радиосвязи для различных частот радиоволн.

Р. Р. Бутрик
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ПУТИ МИНИМИЗАЦИИ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПОМЕХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ АНТЕННО-ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ КВ-ДИАПАЗОНА

Аннотация. Представлены результаты натурных измерений влияния способов минимизации помех на эффективность антенно-приемной системы КВ-диапазона. Проведен теоретический анализ способов минимизации помех, проникающих в антенно-приемную систему КВ-диапазона из внешних и внутренних источников. Полученные результаты показывают, что при грамотной реализации с применением способов минимизации помех можно существенно повысить эффективность антенн КВ-диапазона.
Ключевые слова: КВ-диапазон, уровень шума, ферриты, гальваническая развязка.
Для цитирования: Бутрик Р. Р. Пути минимизации индустриальных помех и их влияние на эффективность работы антенно-приемной системы КВ-диапазона // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

R. R. Butrik
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

WAYS TO MINIMIZE INDUSTRIAL INTERFERENCE AND ITS IMPACT ON THE EFFICIENCY OF THE HF-BAND RECEIVING ANTENNA SYSTEM

Abstract. The paper presents the results of field measurements of the effect of interference minimization methods on the efficiency of the HF-band receiving antenna system. The author analyzes the ways to minimize interference penetrating into the HF-band receiving antenna system from external and internal sources. The obtained results show that with proper implementation using interference minimization methods, it is possible to significantly increase the efficiency of the HF-band antenna.
Keywords: HF band, noise level, ferrites, galvanic isolation.
For citation: Butrik R. R. Ways to minimize industrial interference and their impact on the efficiency of the HF-band receiving antenna system // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В современных реалиях городской среды, когда почти каждое здание оснащено большим количеством индустриальных помех остро встает вопрос, как уменьшить их влияние на эффективность антенно-приемных систем.

Их источником может выступать как здания, насыщенное электроприборами, так и неоптимальность питания самой антенно-приемной системы, которое осуществляется посредством её подключения к сети переменного напряжения 220 В.

Одним из часто упускаемых из виду путей проникновения помех в схему является фидерная линия. В подавляющем большинстве случаев, её прокладывают внутри здания, которое является «зашумленным» пространством, проходя через которое фидер получает шумовые наводки, которые передаются в приемное устройство в виде искаженного сигнала.

Этот эффект легко устраняется применением ферритовых фильтров, представляющих собой намотанный через ферритовые кольца «объемным витком» фидер, позволяющих снизить помехи, наводимых по кабелю и предотвращает превращение фидера в отдельную приемную антенну.

Также возможно проникновение помех посредством соединительных элементов и их передачи в приемное устройство.

Эта возможность исключается использованием гальванической ВЧ-развязкой входа приемника и фидера. Это позволит физически разделить две электрические цепи, за счет питания через электромагнитное поле.

Для более точной оценки результатов экспериментов были поданы сигналы на нескольких частотах (обозначены * на последующих графиках): 3; 7; 11; 16; 23 и 27 МГц.

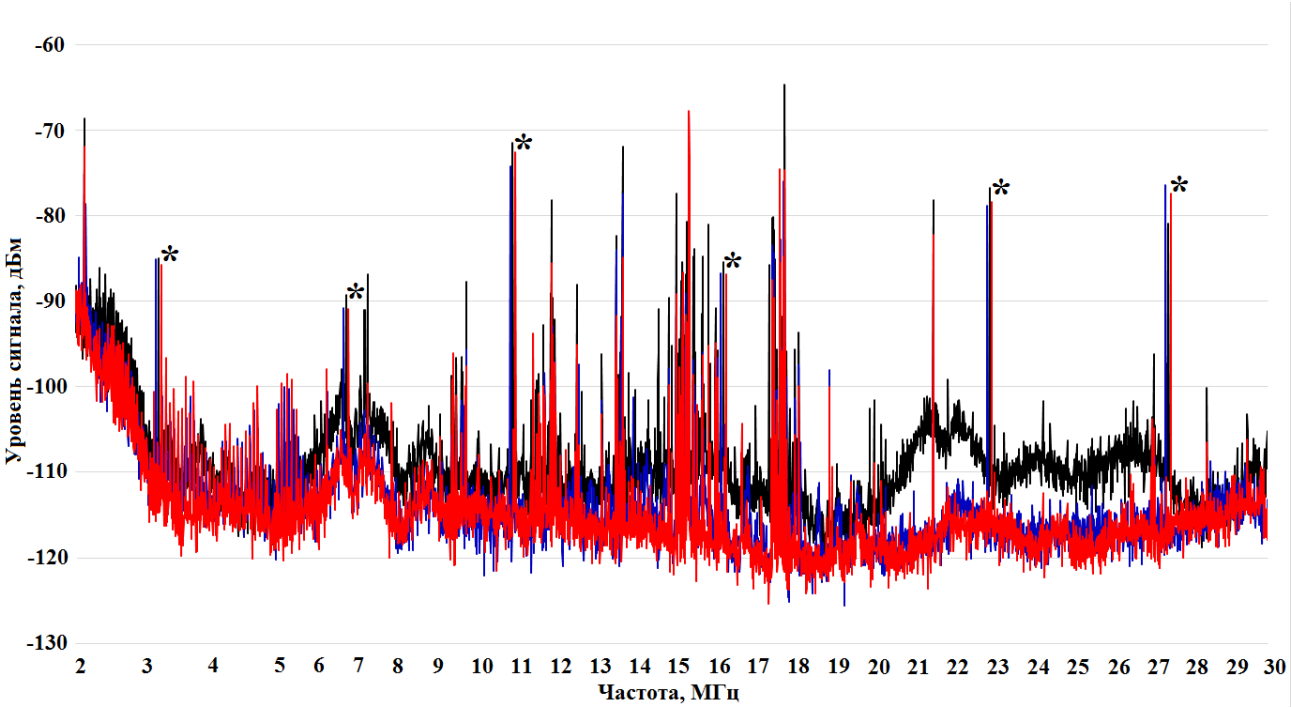


Рис. 1. *Графическое представление результатов эксперимента: черный цвет – «грязный» фидер; синий – фидер с установленными ферритовыми фильтрами; красный – ферритовые фильтры + гальваническая развязка*

Результаты, полученные в ходе натурных измерений, приведены на рис. 1 и позволяют сделать вывод, что установка ферритовых фильтров на фидер приводит к снижению уровня шумов в спектре на величину до 15 дБ.

В показанном на рисунке спектре видно, что уровень шумов снизился в среднем на 5–10 дБ. Так в начале (2–5 МГц) и конце (25–30 МГц) диапазона их влияние минимально, и выражается в снижении уровня шума лишь на 1–2 дБ. Однако в центральной (10–25 МГц) части диапазона снижение достигает 15 дБ.

Дополнительная установка гальванической развязки в схему «радиоприемное устройство – антенна» практически не оказала влияния на уровень шумов. Однако стоит отметить, что основная доля помех проникает в схему через сеть переменного тока 220 В, при выборе неправильного источника питания.

Это обуславливается тем, что к той же сети, что и антенно-приемная система подключаются другие приборы, находящиеся в здании. В результате создается разветвленная сеть кабелей, каждый из которых, в свою очередь, выступает отдельным фидером.

Для того, чтобы минимизировать этот эффект необходимо произвести развязку антенно-приемной системы и сети переменного тока. В ходе исследования были рассмотрены три варианта питания антенны.

Во-первых, была применена автономная аккумуляторная батарея 12 В. Это позволило исключить сеть переменного тока из схемы, создав тем самым «эталонное» питание.

Во-вторых, был использован блок питания с широтно-импульсной модуляцией не обеспечивающий какую-либо защиту оборудования от проникновения помех.

В-третьих, использовался блок питания с встроенным развязывающим трансформатором, который позволяет исключить НЧ-помехи от сети 220 В.

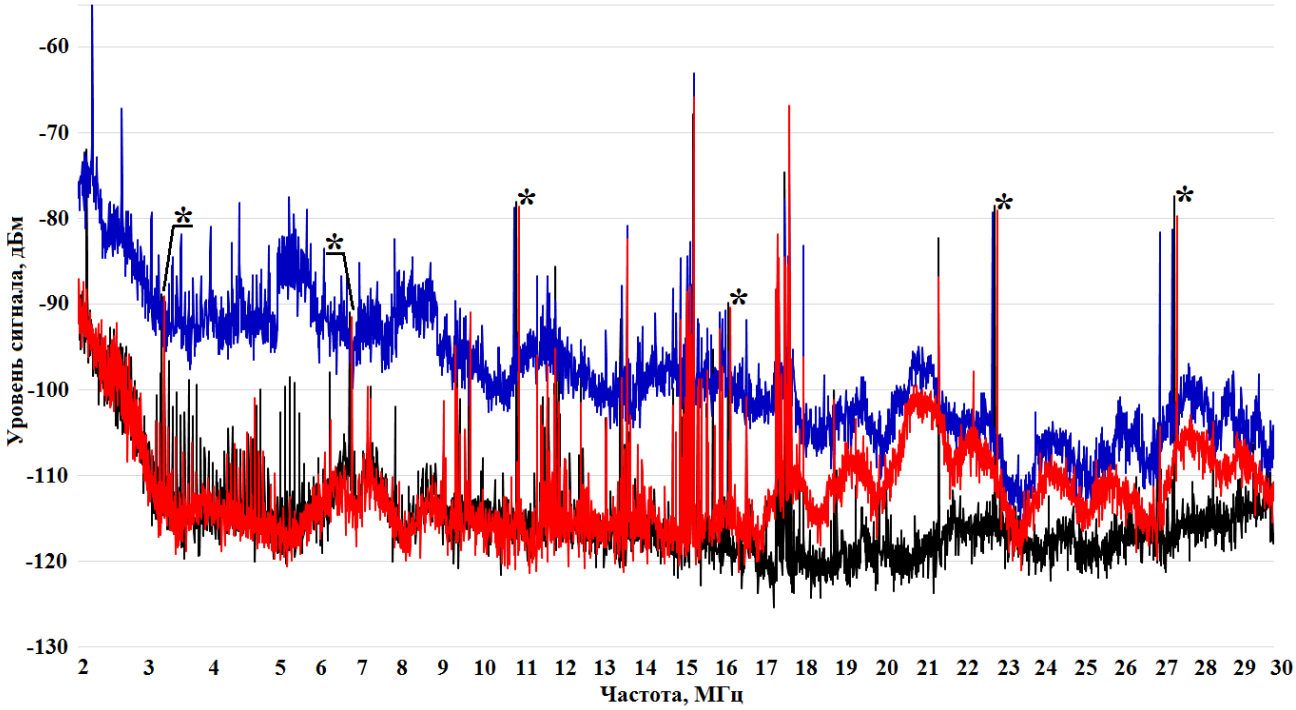


Рис. 2 *Графическое представление результатов эксперимента:*
черный цвет – автономная аккумуляторная батарея 12В;
синий – блок питания с широтно-импульсной модуляцией;
красный – блок питания с встроенным развязывающим трансформатором

Результаты, полученные в ходе натурных измерений, приведены на рис. 2 и позволяют сделать вывод, что использование неоптимального способа питания может приводить к повышению уровня шумов на величину до 30 дБ относительно «эталона».

В показанном на рисунке спектре видно, что использование «незащищенного» питания от блока питания с широтно-импульсной модуляцией не рекомендуется, так как, уровень шумов повышается в среднем на 15–25 дБ, а на первых двух несущих частота и вовсе полностью пропадает возможность принять сигнал.

При проведении эксперимента с блок питания с встроенным развязывающим трансформатором возникла неоднозначная ситуация. В диапазоне 3–14 МГц он показывает себя лучше, чем «эталонная» автономная аккумуляторная батарея. Однако начиная с 15 МГц ослабляет своё влияние и постепенно уступает автономной аккумуляторной батарее, а на некоторых диапазонах и вовсе приближаясь к неоптимальному блоку питания с широтно-импульсной модуляцией.

По итогу проведенных исследований разница в эффективности антенно-приемной системы при соблюдении описанных выше особенностей схемотехнической реализации и их несоблюдении достигает более 25 дБ. Таким образом, грамотная реализация антенно-приемной системы позволяет повысить её эффективность, что приводит к улучшению направленного приёма слабых сигналов с дальних радиостанций.

А. В. Бучельников
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

СПОСОБ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ЕМКОСТЕЙ НА ИМПЕДАНС УСТРОЙСТВ СОГЛАСУЮЩИХ СИММЕТРИРУЮЩИХ С МАСЛЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Аннотация. Представлен способ моделирования симметрирующего согласующего широкополосного трансформатора сопротивления, позволяющий учитывать влияние паразитных емкостей. Проведен сравнительный анализ входного импеданса симметрирующего согласующего широкополосного трансформатора, полученного путем моделирования его эквивалентной схемы, с входным импедансом трансформатора серийного образца.
Ключевые слова: моделирование, входной импеданс, КВ-диапазон, устройство согласующее симметрирующее.
Для цитирования: Бучельников А. В. Способ учета влияния паразитных емкостей на импеданс устройств согласующих симметрирующих с масляным охлаждением // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества: тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2026.

A. V. Buchelnikov
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

METHOD FOR ACCOUNTING THE IMPACT OF PARASITIC CAPACITANCES ON THE IMPEDANCE OF BALANCING MATCHING DEVICES WITH OIL COOLING

Abstract. The paper presents a method for modeling a balanced broadband impedance-matching transformer, which accounts for the influence of parasitic capacitances. The input impedance of the balanced broadband impedance-matching transformer, obtained by modeling its equivalent circuit, is analyzed and compared with the input impedance of a commercially produced transformer.
Keywords: modeling, input impedance, HF band, balancing matching device.
For citation: Buchelnikov A. V. Method for accounting the impact of parasitic capacitances on the impedance of balancing matching devices with oil cooling. // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В радиотехнических системах современного мира не теряют своей актуальности вопросы согласования волнового сопротивления фидерного тракта с входным сопротивлением антенны, а также обеспечение симметричного возбуждения поверхности антенны. Необходимо отметить, что интерес к трансформирующим устройствам, выполненным с использованием ферритовых кольцевых магнитопроводов, обусловлен в первую очередь, высокими показателями их КПД и минимизацией габаритных размеров. По-прежнему требуются поиски современных, принципиально новых подходов к

решению возникающих в этой области задач, что подтверждает целесообразность и актуальность рассматриваемого вопроса.

На сегодняшний день в радиоэлектронной аппаратуре одними из наиболее востребованных являются коаксиальные кабели стандартного номинала 50 или 75 Ом в зависимости от области применения, которые необходимо подключить к фидерному тракту, имеющему, в свою очередь, значения входных сопротивлений в диапазоне от единиц до сотен Ом. В связи с этим появляется необходимость разработки соответствующих устройств, способных трансформировать несимметричное коаксиальное выходное сопротивление во входное симметричное сопротивление антенны.

В известных автору данной работы источниках, проектирование устройства согласующего симметрирующего (УСС) производится путем расчета количества витков первичной и вторичной обмоток трансформаторов, определяемых радиофизическими и геометрическими параметрами применяемых ферритовых сердечников, а также значениями входного и выходного импеданса (коэффициентом трансформации). Известные эквивалентные схемы и способы учета паразитных емкостей приведены для конструкций с воздушным охлаждением и не учитывают изменения, возникающие при размещении трансформаторов в металлический корпус, заполненный маслом. Кроме этого, нагрузка, как правило, задается как резистивная нагрузка без потерь, что не соответствует действительности.

Целью данной работы является сравнительный анализ частотных характеристик входного импеданса УСС, с учетом влияния паразитных емкостей, полученные в результате моделирования и экспериментальным путем.

В данной работе в качестве объекта исследования выступало УСС для работы с подводимой мощностью до 6,3 кВт с коэффициентом трансформации 1:6, помещенное в металлический корпус и залитое маслом (рис. 1).

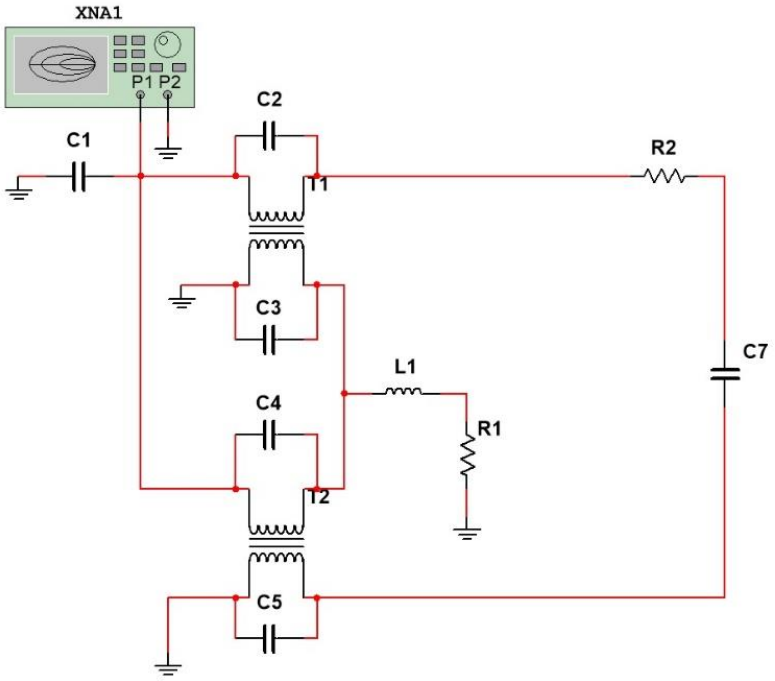


***Рис. 1**. Эквивалентная схема УСС*

Для получения частотных характеристик активной и реактивной частей импеданса были проведены измерения импеданса на входе УСС. Измерение входных параметров, проводилось с использованием векторного анализатора цепей. Перед измерением анализатор цепей устанавливали в режим измерения активной и реактивной со-

ставляющих полного сопротивления Re и Im в диапазоне частот от 1,0 до 31,0 МГц. Выполнялась калибровка прибора в соответствии с техническим описанием и инструкциями на прибор. Изначально проводилось измерение реактивной составляющей Im входного сопротивления. По показаниям прибора в диапазоне частот 1,5-30 МГц с шагом 0,5 МГц фиксировалось значение реактивной составляющей измеряемой антенны. Дополнительно проводились измерения на частотах, при которых наблюдались максимальные (при $X_A = max$) и минимальные (при $X_A = min$) значения реактивной составляющей входного импеданса. Затем проводилось измерение активной составляющей R входного сопротивления антенны на тех же частотах. Также были измерены частотные зависимости активной и реактивной частей импеданса нагрузки, подключенной к выходным контактам УСС (рис. 2).

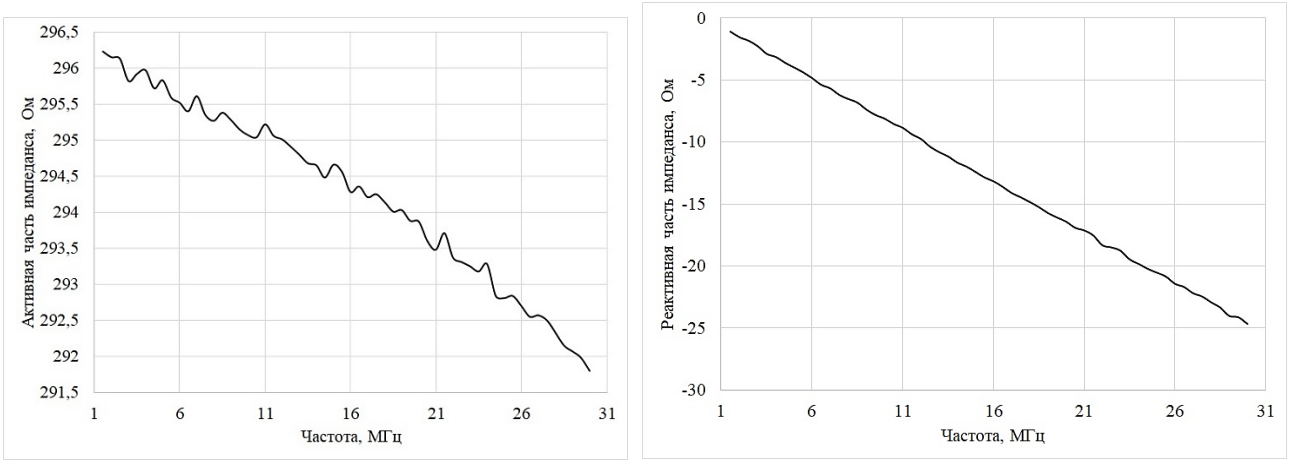


***Рис. 2**. Частотная характеристика активной и реактивной частей импеданса нагрузки*

Для определения значений паразитной емкости были измерены значения индуктивности первичной и вторичной обмоток трансформаторов, входящих в состав УСС, помещенных в корпус в воздухе и залитых маслом. Также была определена частота параллельного резонанса, а затем, применяя формулу (1), были рассчитаны значения паразитной емкости для каждой обмотки трансформаторов, входящих в состав УСС.

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Далее реактивная часть импеданса нагрузки, пересчитывалась для соответствующей частоты в значение сосредоточенной емкости, а активная часть напрямую использовалась в виде резистора в доступном пакете прикладных программ для расчета электрических цепей.

Затем проводился расчет импеданса на входе УСС, с подключенной комплексной нагрузкой. Конденсатор С1 имитировал подстроечную емкость, устанавливаемую в серийный образец, конденсаторы С2-С4 имитировали паразитную емкость, возникающую между обмотками трансформатора. Расчет проводился в программном обеспечении для моделирования и анализа электрических схем. В результате проведенного моделирования были получены частотные зависимости активной и реактивной составляющей входного импеданса УСС (рис. 3).

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Во-первых, значение паразитной емкости, возникающей между обмотками трансформаторов, зависит от типа корпуса и среды, в которой размещен УСС.

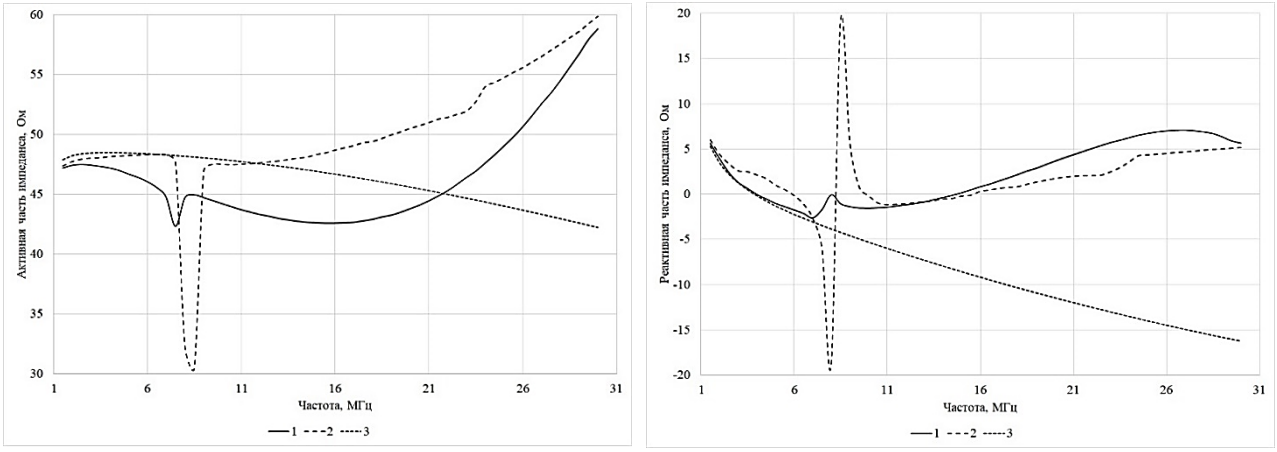


***Рис. 3**. Частотная характеристика активной и реактивной частей импеданса УСС, измеренные экспериментально (1) и полученные в результате моделирования с учетом паразитной емкости и нагрузки (2), и без влияния (3)*

Во-вторых, включение в эквивалентную схему конденсаторов позволяет в некоторой степени имитировать паразитную емкость, возникающую между обмотками трансформатора, а учет влияния паразитной емкости, а также частотного изменения активной и реактивной составляющей нагрузки на этапе моделирования позволяет получить более точные частотные характеристики активной и реактивной части входного импеданса проектируемого УСС.

Работа выполнена в рамках государственного задания ОНЦ СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Г. Г. Вертоградов, В. Д. Черных
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ВОЗДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОЙ БУРИ 20 ЯНВАРЯ 2026 Г. НА МАКСИМАЛЬНО НАБЛЮДАЕМУЮ ЧАСТОТУ

Аннотация. Представлены результаты распространения мод на радиотрассе Кипр – Ростов-на-Дону при условии высокой геомагнитной активности. Установлено, что в период высоковозмущенной ионосферы среднее значение максимально наблюдаемой частоты в дневное время увеличилось на 13% по сравнению с фоновой активностью.
Ключевые слова: наклонное ЛЧМ-зондирование, максимально наблюдаемая частота, геомагнитная буря, перемещающиеся ионосферные возмущения, ионосферное распространение.
Для цитирования: Вертоградов Г. Г., Черных В. Д. Воздействие магнитной бури 20 января 2026 г. на максимально наблюдаемую частоту // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

G. G. Vertogradov, V. D. Chernykh
Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

IMPACT OF THE MAGNETIC STORM OF JANUARY 20, 2026 ON THE MAXIMUM OBSERVED FREQUENCY

Abstract. This paper presents the results of mode propagation on the Cyprus–Rostov-on-Don radio path under conditions of high geomagnetic activity. It was found that, during periods of high ionospheric disturbance, the average daytime maximum observed frequency increased by 13% compared to background activity levels.
Keywords: oblique LFM sounding, maximum observed frequency, geomagnetic storm, traveling ionospheric disturbances, ionospheric propagation.
For citation: Vertogradov G. G., Chernykh V. D. Impact of the magnetic storm of January 20, 2026 on the maximum observed frequency // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Влияние геомагнитной бури на состояние ионосферы представляет собой сложное явление. При воздействии сильных геомагнитных бурь наблюдается сильное изменение основных характеристик распространение коротковолнового радиоканала вплоть до полного прекращения существования канала связи. Возникают ионосферные возмущение различных масштабов, которые нарушают регулярную структуру, создавая неоднородности различных размеров, что приводит к значительным флуктуациям максимально наблюдаемой частоты, изменению мощности сигнала в точке приема, искривление лучевых траекторий. Целью данной работы является оценка влияния геомагнитных бурь на максимально наблюдаемую частоту для коротковолнового сеанса связи.

Проводя анализ значений *Dst* и Kp индексов представленных на рис. 1 можно сделать следующие заключения: с 18 января по 19 января до 19:00 UT $Kp < 3$, *Dst* - индекс колеблиться на уровне фоновых значений, что свидетельствует о низком уровне геомагнитной активности. С 19 января во временном промежутке с 19:00–20:00 UT происходит рост индекса Kp до 8,3, *Dst*-индекс в начале возрастает до 68 нТл, затем уменьшается до

-119 нТл, что интерпретировано как начало магнитного возмущения. Далее *Dst*-индекс уменьшается до -214 нТл, что демонстрирует высокий уровень магнитной бури. Значения *Dst*-индекса меньше –100 нТл в течение 20 и 21 января до 15:00 UT, *Kp*- индекс находится в пределах 7. Днем 22 января геомагнитные бури носят слабый характер индексы *Kp* и *Dst* варьируются в пределах значений менее 2 и –50 нТл соотвественно. Далее *Kp* индекс возрастает от 4–5 с 23 по 24 января, после становится меньше 3 и *Dst*-индекс находится вблизи значений на уровне ~-40нТл.

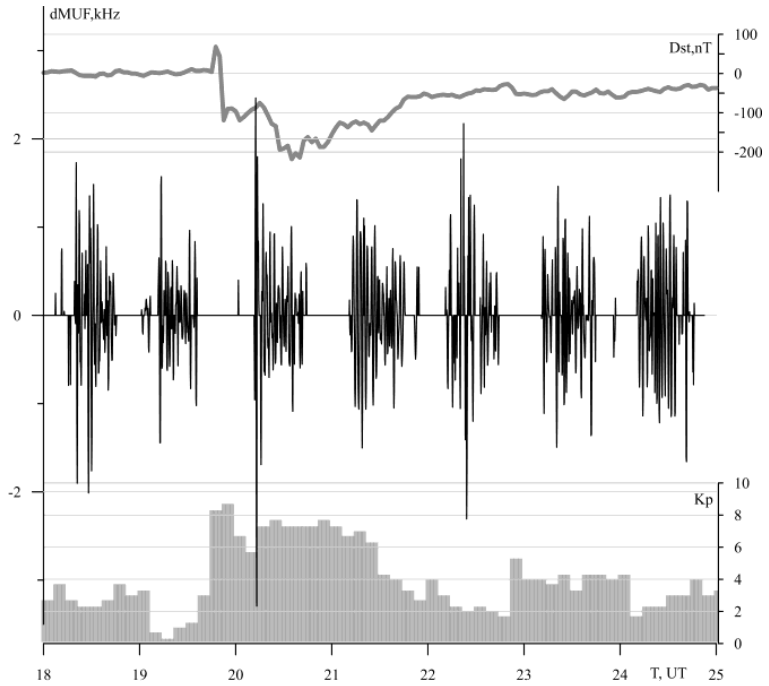


Рис. 1. *Вариации максимально наблюдаемой частоты в период 18-24 января – черная линия. Вариации Dst-индекса показаны вверху; изменения Kp-индекса – в нижней части столбцами*

Измерения максимально наблюдаемой частоты проводились круглосуточно с 18 по 24 января на радиотрассе Ростов-на-Дону (47,2 с.ш., 39,6 в.д.) – Кипр (35,1 с.ш., 33,9 в.д.) длина трассы составляет 1433 км, скорость перестройки передатчика расположенного на Кипре происходит в режиме линейно частотной модуляции со скоростью 100 кГц/с, начальная частота сканирования – 8 МГц, период перестройки составляет 300 с. Приемник располагается в Ростове-на-Дону, который построен на основе SDRPlay RSPdx технологии. Временная синхронизация производится по секундной метке Global Positioning System приемника. Прием сигнала производится на широкополосную активную рамочную антенну с диаметром 0,6 м.

На рис. 2 отображены следующие величины: черная линия с точками показывает измеренные значения максимально наблюдаемой частоты, сплошная серая линия иллюстрирует максимально наблюдаемой частоты в условии слабой возмущенной ионосферы, горизонтальные серые линии отображают средние дневные значения максимально наблюдаемой частоты для каждого дня измерений. Следует отметить, что из-за начальной частоты передатчика 8 МГц в ночных измерениях на графике наблюдаются провалы. Из рис. 2 видно, что в период спокойных или малых ионосферных возмущений, который приходится на временной период, описанный ранее, вариации максимально наблюдаемой частоты незначительны и составляют 21283 кГц и 21366 кГц. В момент начала магнитной бури средние значения максимально наблюдаемой частоты составили 24101 кГц. Днем 21 января, когда наблюдается незначительное снижение геомагнитной бури *Kp*- индекс снизился с 7 до 6,3 при этом квазимгновенные значения максимально наблюдаемой частоты составили 23198 кГц. Днём 22 января,

когда значения Kp ~2, при этом значение *Ds*-индекса колеблится в диапазоне ~50 нТл в этот период значение максимально наблюдаемой частоты было эквивалентно невозмущенному состоянию – 21191 кГц. Данный факт свидетельствует о том, что значения *Dst*-индекса не оказывают влияние на максимально наблюдаемой частоты, если при этом значение Kp индекса соответствует невозмущенному состоянию Kp < 2.

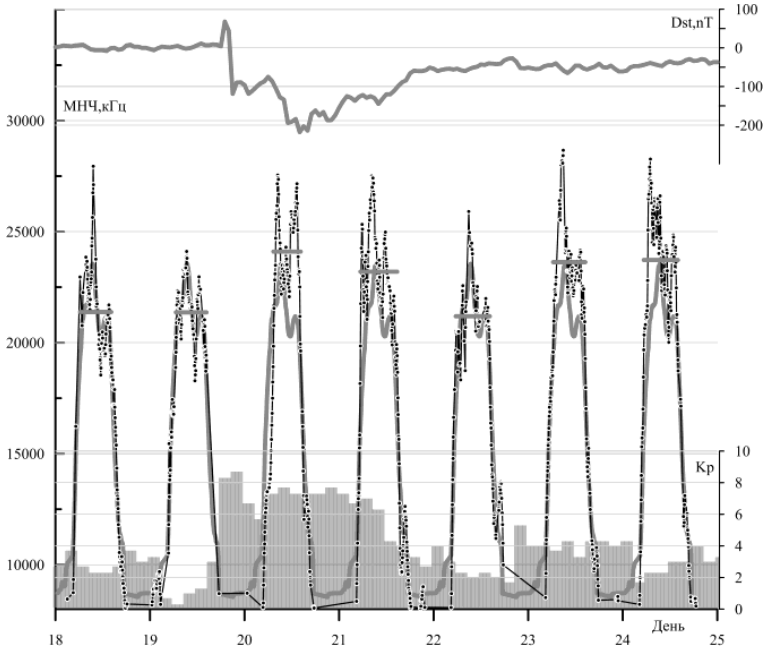


***Рис. 2**. Сплошная серая линия – фоновые значения, черная линия с точками – квазимгновенные значения, горизонтальные серые отрезки – средние дневные значения максимально наблюдаемой частоты. Вариации Dst-индекса показаны вверху; изменения K_p-индекса – в нижней части столбцами*

Для анализа изменений квазимгновенных значений максимально наблюдаемой частоты в период с 18 по 24 января, использовался фильтр Марме. Исходя из представленных результатов на рис. 1 видно, что в спокойных геомагнитных условиях амплитуда флуктуаций составляет от 1,5 до 1,8 МГц. Причиной этого является перемещение пространственно ионосферных возмущений, которые приводят к Z-образованиям. С течением времени они перемещаются в область уменьшение временной задержки и на краю дистанционно-частотной характеристики наблюдаются искажения на каждой магнитноионной компоненты. В следствии этого наблюдаются периодические флуктуации максимально наблюдаемой частоты. В связи с началом магнитной бури с 19 января 20:00 UT амплитуда максимально наблюдаемой частоты выросла до 2,5 МГц, затем уменьшилась до 2,1 МГц. В целом можно сказать, что для спокойных и слабовозмущенных условиях флуктуации под влиянием пространственно ионосферных возмущений максимально наблюдаемой частоты варьируются пределах от 1 до 1,8 МГц.

Из вышеизложенного можно сделать следующие заключения: При воздействие сильной геомагнитной бури среднее дневное значение максимально наблюдаемой частоты возрастает на 13%. Определяющим фактором влияющий на изменение максимально наблюдаемой частоты является Kp - индекс. Флуктуации максимально наблюдаемой частоты под влиянием пространственных ионосферных возмущений в условиях спокойной ионосферы составляет порядка 1–1,5 МГц. При наличие сильной геомагнитной бури оцениваются в 2,1–2,5 МГц.

А. Л. Гаврик, Л. А. Луканина
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук, Фрязинский филиал, Фрязино, Российская Федерация

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ, ПОЛУЧЕННОГО ПО ДАННЫМ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ

Аннотация. Обсуждаются факторы, ограничивающие проверку достоверности возмущений электронной концентрации, выявленных в процессе интегрального преобразования данных радиопросвечивания ионосферы. Показано, что высокочувствительный метод, основанный на линейной взаимосвязи между вариациями рефракционного изменения мощности радиоволны и вариациями скорости изменения ее частоты, позволяет оценить достоверность обнаруженных возмущений электронной концентрации.
Ключевые слова*:* ионосфера, радиопросвечивание, профиль электронной концентрации.
Для цитирования*:* Гаврик А. Л., Луканина Л. А. Оценка достоверности профиля электронной концентрации, полученного по данным радиопросвечивания // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. L. Gavrik, L. A. Lukanina
Kotelnikov Institute of Radioegineering and Electronics of RAS
Fryazino Branch, Fryazino, Russian Federation

EVALUATION OF THE ELECTRON DENSITY PROFILE RELIABILITY OBTAINED FROM RADIO OCCULTATION DATA

Abstract. The paper discusses the factors limiting the verification of the reliability of electron density disturbance identified during the integral transformation of radio occultation data of the ionosphere. It is shown that a highly sensitive method based on the linear relationship between variations in the refractive change in radio wave power and variations in the rate of change in its frequency makes it possible to assess the reliability of the detected electron density disturbance.
Keywords: ionosphere, radio occultation, electron density profile.
For citation: Gavrik A. L., Lukanina L. A. Evaluation of the electron density profile reliability obtained from radio occultation data // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Методы анализа радиополя в экспериментах радиопросвечивания ионосфер планет были разработаны после запуска первых космических аппаратов к Марсу и Венере. В настоящее время радиопросвечивание активно применяется для определения параметров ионосферы Земли посредством регистрации радиосигналов, поступающих с высокоорбитального аппарата глобальной навигационной спутниковой системы на низкоорбитальный космический аппарат с приемным устройством, когда радиолиния передатчик-приемник погружается в околоземную ионосферу. Радиопросвечивание реализуется в случае, если орбита принимающего спутника позволяет наблюдать радиозатмение сигнала излучающего спутника. В процессе погружения в ионосферу радиолуч отклоняется от прямолинейного направления на угол рефракции, величина которого зависит от коэффициента преломления среды в каждой точке трассы распространения радиоволны. По измеренным вариациям фазы и амплитуды радиоволны при известных

эфемеридах спутников можно вычислить высотный профиль угла рефракции радиолуча. Применение модели высокочастотного приближения геометрической оптики, в которой ионосфера сферически симметричная, отсутствуют столкновения нейтральных частиц с заряженными, угол рефракции не превышает 10^{-4} рад, а также пренебрежимо малы шумы радиоаппаратуры, позволило вывести интегральные уравнения для определения характеристик высотного профиля электронной концентрации $N(h)$. В рамках указанной модели высотный профиль коэффициента преломления среды связан с профилем угла рефракции радиоволны интегральным уравнением, причем коэффициент преломления среды линейно зависит от концентрации электронов. Теоретические соотношения для расчета профиля $N(h)$ описаны в научных статьях и книгах, их постоянно используют для анализа параметров земной ионосферы.

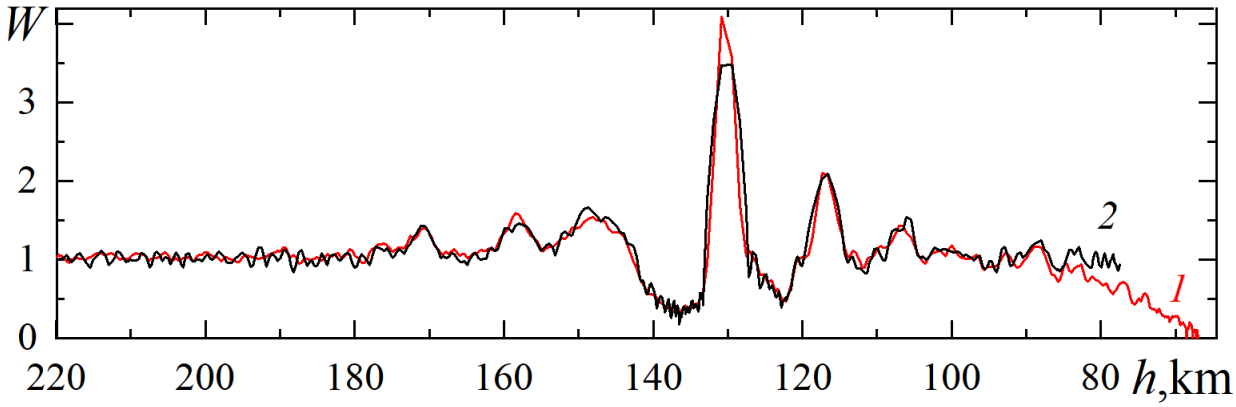
Радиозатменный метод мониторинга ионосферы обеспечивает регулярное получение экспериментального материала о состоянии и вариациях электронной концентрации, однако точное вычисление профилей $N(h)$ неосуществимо вследствие невозможности полного описания неоднородностей среды на трассе радиосвязи. Особую проблему при оценке достоверности профилей $N(h)$ представляют ионосферные неоднородности и возмущения, возникающие в периоды геомагнитных бурь, когда состояние ионосферы изменяется динамично. Общепринятый подход к решению обратной задачи позволяет получить профиль $N(h)$, но на фоне непредсказуемых вариаций фазы сигнала возникают неопределенности при извлечении сведений о характеристиках многомасштабных неоднородностей электронной концентрации ионосферы. Следовательно, требуется детальный анализ измерений, поскольку мешающие факторы могут поставить под угрозу точность полученной информации об ионосфере, в то время как точность прогноза профилей $N(h)$ напрямую определяет качество радиосвязи и навигационного позиционирования объектов по сигналам глобальной навигационной системы спутников.

Основным фактором, ограничивающим точность радиозатменных данных, выступают инструментальные шумы используемых радиосистем. Кроме того, погрешности определения $N(h)$ зависят от величины случайного шума и небольшого тренда частоты радиоволны, вызванных воздействием среды за пределами исследуемой ионосферы. Дополнительным источником погрешностей может быть нарушение приближения о сферической симметрии ионосферы в случаях, когда электронная концентрация зависит не только от высоты, но и от локального зенитного угла Солнца на трассе радиолуча. Многообразие мешающих факторов ограничивает достоверность зарегистрированных отклонений в профилях $N(h)$. Поэтому актуальной задачей является разработка новых подходов к анализу данных радиопросвечивания, которые обеспечат идентификацию влияния мешающих факторов при интерпретации возмущений ионосферы.

Предложенный метод основан на установленной теоретической линейной взаимосвязи вариаций параметров радиоволны и прецизионном определении огибающей и фазы сигнала в условиях радиопросвечивания сферически симметричной ионосферы при отсутствии мешающих факторов. Данная методика позволяет выявлять наличие разномасштабных возмущений $N(h)$, образующихся в ионосфере, без использования интегральных преобразований данных. Поскольку амплитудные и частотные шумы имеют различную природу и являются некоррелированными, высокая корреляция между колебаниями рефракционных изменений мощности сигнала и скоростью изменения его частоты служит индикатором присутствия регулярных ионосферных структур и подтверждает корректность применяемой модели. Нарушение корреляционной связи между амплитудными и частотными вариациями будет свидетельствовать о существенном влиянии на расчеты $N(h)$ шумов либо других неучтенных явлений, таких как асимметрия ионосферы, дифракционные эффекты, поглощение радиоволн и т.п.

Эффективность подхода была проверена в ходе экспериментов радиопросвечива-

ния ионосферы Венеры. Главным достоинством этого эксперимента было использование радиоволны 32 см, обеспечившее существенное превышение эффектов просвечивания ионосферы над случайными флуктуациями, так как частотный сдвиг в плазме прямо пропорционален длине волны, а изменение мощности – ее квадрату. Более того, радиопросвечивание было двухчастотным, что позволило исключить влияние атмосферы и движение спутников. На рисунке представлено сопоставление измеренной нормированной мощности сигнала с мощностью, рассчитанной по скорости изменения частоты излучения. Выше 180 км значительные градиенты $N(h)$ отсутствовали, поэтому флуктуации мощности относительно единичного уровня (кривая 1) отражают воздействие шума. Шум также присутствует в частотных данных (кривая 2), причем корреляция амплитудного шума с частотным отсутствует. Ниже 180 км возникают слоистые структуры ионосферной плазмы, влияющие на амплитуду и частоту сигнала, и на рисунке заметно отчетливое совпадение колебаний графиков 1 и 2 в интервале высот 85…175 км. Высокая корреляция амплитудных и частотных данных на высотах 115…175 км в области максимальной концентрации ионосферы подтверждает теоретические выводы и указывает на достоверность профилей $N(h)$, построенных в рамках принятой модели. Обнаружение тесной корреляции амплитудных данных с частотными на высотах 85...115 км наряду с превышением полезных эффектов над шумом позволило доказать существование слоистых ионизованных структур ниже 115 км. Ниже 90 км появляется рефракционное ослабление мощности сигнала из-за возрастающей плотности нейтральной атмосферы, а шумовая составляющая частоты увеличивается на фоне снижения отношения сигнал/шум.



Измеренная нормированная мощность радиоволны 32 см W (кривая 1) и мощность, вычисленная по скорости изменения частоты радиоволны (кривая 2). h – высота над поверхностью Венеры

Полученные результаты указывают на необходимость регистрации вариаций мощности радиоволн в более мощной и протяженной ионосфере Земли, начиная с высоты 600 км, что позволит применять методику детектирования плазменных слоев для выявления ионосферных неоднородностей на фоне шумов и иных неучтенных факторов, включая асимметрию ионосферы, дифракцию и поглощение радиоволн. Использование данной методики при анализе результатов радиопросвечивания позволит отфильтровать сеансы наблюдений с высоким уровнем мешающих помех и слабой корреляцией амплитудных и частотных данных. Ключевым фактором является высокая степень корреляции между амплитудными и частотными данными, которая гарантирует достоверность восстановления профиля электронной концентрации $N(h)$ общепринятым методом и подтверждает реальность обнаруженных возмущений.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

М. М. Гаврилов, А. В. Груша, П. В. Куприянов, С. А. Силаев, Е. В. Терешкин
АО «НПП «Исток» им. Шокина», Фрязино, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В КВАДРАТУРНОЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ

***Аннотация*.** Работа посвящена исследованию точности амплитудно-фазового распределения в приёмопередающих модулях активных фазированных антенных решеток на базе квадратурного модулятора (альтернатива каскаду «фазовращатель–аттенюатор»). Экспериментально определены частотные и температурные зависимости ошибок установки амплитуды и фазы для X- и Ku-диапазонов, разработан и апробирован метод калибровки. Результаты подтверждают пригодность квадратурных модуляторов для построения активных фазированных антенных решеток с низким уровнем боковых лепестков.
Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, квадратурный модулятор, приёмопередающий модуль, точность диаграммообразования, X-диапазон, Ku-диапазон.
Для цитирования: Гаврилов М. М., Груша А. В., Куприянов П. В., Силаев С. А., Терешкин Е. В. Исследование точности амплитудно-фазового распределения в квадратурной активной фазированной антенной решетке // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

M. M. Gavrilov, A. V. Grysha, P. V. Kypriyanov, S. A. Silaev., E. V.Tereshkin
JSC "RPC "Istok" named after Shokin", Fryazino, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF AMPLITUDE-PHASE DISTRIBUTION IN A QUADRATURE ACTIVE PHASED ARRAY ANTENNA

Abstract. The paper investigates the accuracy of the amplitude-phase distribution in transmit/receive modules of active phased array antennas based on a quadrature modulator (an alternative to the phase shifter–attenuator cascade). The frequency and temperature dependencies of amplitude and phase setting errors for the X- and Ku-bands were determined experimentally; a calibration method was developed and validated. The results confirm the suitability of quadrature modulators for designing active phased array antennas with low sidelobe levels.
Keywords: AESA, quadrature modulator, transmit-receive module, beamforming accuracy, X-band, Ku-band.
For citation: Gavrilov M. M., Grysha A. V., Kypriyanov P. V., Silaev S. A., Tereshkin E. V. Investigation of the accuracy of amplitude-phase distribution in a quadrature active phased array antenna // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Активные фазированные антенные решётки стали основой архитектуры современных радиолокационных станций, систем связи и радиоэлектронной борьбы. Ключевым элементом активной фазированной антенной решётки является приёмопередающий модуль, в котором формируется комплексный весовой коэффициент канала – амплитуда и фаза сигнала излучателя. Именно приёмопередающий модуль определяет основную долю стоимости решётки, её энергопотребление и достижимую точность диаграммообразования. Погрешности установки амплитуды и фазы по апертуре напрямую переходят в ошибки установки луча, рост уровня боковых лепестков, снижение коэффи-

циента усиления и ограничение глубины формируемых нулей диаграммы направленности. Для решёток с низким уровнем боковых лепестков допустимые среднеквадратические погрешности по апертуре составляют десятые доли градусов по фазе и десятые доли децибела по амплитуде, причём эти требования должны выполняться во всей полосе рабочих частот и во всём диапазоне рабочих температур.

В приёмопередающих модулях активных фазированных антенных решёток формирование амплитудно-фазового распределения канала традиционно выполняется каскадом из дискретного фазовращателя и аттенюатора. Наиболее распространены 6-битные фазовращатели с шагом 5,625 градуса. Такое решение отработано технологически, однако обладает рядом принципиальных недостатков: неустранимой ошибкой квантования фазы и амплитуды, значительными вносимыми потерями пассивного тракта и трудоёмкой процедурой калибровки, объём которой растёт как произведение числа состояний обоих устройств. Альтернативой является квадратурный (векторный) модулятор, в котором амплитудно-фазовое распределение формируется как сумма двух квадратурных составляющих с независимо регулируемыми амплитудами. Фаза и амплитуда результирующего сигнала при этом задаются совместно и устанавливаются практически непрерывно, с шагом, определяемым лишь разрядностью управляющих цифроаналоговых преобразователей. Достоинствами такого решения являются отсутствие ошибки квантования фазы в её традиционном понимании, малые вносимые потери, объединение управления фазой и амплитудой в одном активном звене и, как следствие, сокращение числа управляемых элементов в тракте модуля. Вопрос о том, в какой мере эти зависимости ограничивают характеристики решётки и насколько они поддаются устранению калибровкой, в литературе освещён недостаточно, что и определило задачу настоящего исследования.

Целью работы являлось экспериментальное определение частотной и температурной зависимости ошибок установки амплитуд и фаз квадратурным модулятором X- и Ku-диапазона, разработка и проверка метода калибровки, пригодного для применения в составе приёмопередающего модуля активной фазированной антенной решетки с низким уровнем боковых лепестков. В ходе исследования были проведены измерения зависимости установленной фазы и амплитуды от частоты и температуры в рабочем диапазоне модуля по сетке управляющих кодов, покрывающей всю область квадратурного созвездия. Для каждого состояния определены отклонения фазы и амплитуды от номинальных значений, по которым вычислены среднеквадратические ошибки установки по совокупности частот и температур. Такой подход позволяет характеризовать модулятор не в отдельной точке, а во всей области условий эксплуатации, что соответствует реальному режиму работы модуля без перекалибровки в процессе функционирования.

Экспериментально установлено, что до калибровки среднеквадратическая ошибка фазы и ошибка амплитуды по совокупности частот и температур составляет $\sigma\varphi \approx 0{,}81°$ и $\sigma A \approx 0{,}9$ дБ для X-диапазона частот, $\sigma\varphi \approx 1{,}1°$ и $\sigma A \approx 1{,}2$ дБ для Ku-диапазона частот. Калибровка проводилась автоматически и выполнена на основе измерений амплитуды и фазы в рабочей полосе частот и температуре. Измерения проводились на векторном анализаторе цепей с поиском оптимальных значений кодов установки для цифрового преобразователя. На основе полученных данных созданы таблицы с поправками зависимостей кодов установки от рабочей частоты и температуры. Данные поправки применяются арифметически к управляющим кодам и не требуют вмешательства в СВЧ-тракт или введения дополнительных корректирующих элементов, а объём калибровочных данных оказывается на один-два порядка меньше, чем для таблицы поправок по всем сочетаниям состояний пары фазовращатель–аттенюатор. После калибровки среднеквадратические ошибки составляют $\sigma\varphi \approx 0{,}1°$ по фазе и $\sigma A \approx 0{,}3$ дБ по амплитуде в обоих диапазонах частот. Таким образом, фазовая ошибка уменьшается на порядок, тогда как

амплитудная — примерно в три раза. Различие в эффективности коррекции объясняется тем, что алгоритм калибровки не учитывал дрейф общего коэффициента передачи модулятора, который проявляется преимущественно в амплитудном канале.

Проведённое исследование показывает, что квадратурный модулятор в X- и Ku-диапазонах после калибровки обеспечивает точность установки комплексного амплитудно-фазового распределения, по фазе на порядок выше чем у дискретных фазовращателей высокой разрядности. В квадратурном модуляторе практически отсутствуют лепестки квантования, что делает его конкурентоспособным решением при построении схем диаграммообразования активных фазированных антенных решеток.

Достигнутая точность установки фазы и амплитуды в ППМ позволит реализовать уровни боковых лепестков и глубину нулей квадратурной АФАР, недостижимые для дискретных схем формирования амплитудно-фазового распределения.

К. А. Голубева
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ОРБИТАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ

Аннотация. Рассмотрены особенности электромагнитных волн с орбитальным угловым моментом и принципы их формирования с помощью антенных систем. Проанализирована роль фазового управления в формировании пространственной структуры поля. Рассмотрена возможность применения антенных решёток для генерации различных мод ОУМ и передачи информации.
Ключевые слова: орбитальный угловой момент, электромагнитная волна, антенная система, антенная решетка, фазовое распределение, пространственная структура поля.
Для цитирования: Голубева К. А. Исследование антенных систем для генерации электромагнитных волн с орбитальным угловым моментом // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

K. A. Golubeva
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF ANTENNA SYSTEMS FOR GENERATING ELECTROMAGNETIC WAVES WITH ORBITAL ANGULAR MOMENTUM

Abstract. The paper considers the principles of generating electromagnetic waves carrying orbital angular momentum using antenna systems. The author analyzes the effect of phase control on the spatial structure of the field and the potential of antenna arrays for generating different OAM modes and transmitting information.
Keywords: orbital angular momentum, electromagnetic wave, antenna system, antenna array, phase distribution, spatial field structure.
For citation: Golubeva K. A. Investigation of antenna systems for generating electromagnetic waves with orbital angular momentum // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Современные системы беспроводной связи предъявляют повышенные требования к эффективности использования электромагнитного спектра и пропускной способности каналов передачи информации. Одним из перспективных направлений развития радиотехнических систем является использование дополнительных пространственных характеристик электромагнитного поля. К таким характеристикам относится орбитальный угловой момент (ОУМ) электромагнитной волны.

Электромагнитное поле с ненулевым орбитальным угловым моментом характеризуется пространственно неоднородным распределением фазы. В поперечной плоскости такая структура может иметь винтовой характер, при этом изменение фазы происходит при перемещении вокруг оси распространения волны. Различные пространственные состояния поля могут быть связаны с различными значениями орбитального углового момента, что создаёт возможность использования данной характеристики при формировании и передаче информации.

Для генерации электромагнитных волн с ОУМ могут применяться различные

устройства, в том числе антенные решетки. Особый интерес представляют кольцевые антенные решетки, состоящие из нескольких излучающих элементов, расположенных по окружности относительно общей оси. Существенным преимуществом такого подхода является возможность формирования требуемой пространственной структуры поля без использования сложных механических элементов. Управление характеристиками излучения осуществляется за счёт изменения амплитудно-фазового распределения сигналов на отдельных элементах решетки.

В рамках настоящего исследования рассматривается модель кольцевой антенной решетки, элементы которой расположены равномерно по окружности. Предполагается, что каждый элемент возбуждается гармоническим сигналом, а фаза сигнала последовательно изменяется при переходе от одного элемента к соседнему. Таким образом, между соседними излучателями устанавливается определённый фазовый сдвиг.

Изменение фазового распределения приводит к изменению результирующего электромагнитного поля в дальней зоне. При синхронном возбуждении всех элементов без дополнительного фазового сдвига формируется поле с осесимметричной составляющей. При введении последовательного фазового сдвига возникает азимутальная зависимость фазы результирующего поля. Именно такая зависимость является характерным признаком формирования пространственной моды, связанной с орбитальным угловым моментом.

Одним из основных параметров исследования является количество элементов антенной решетки. При небольшом количестве излучателей пространственная дискретизация фазового распределения становится более выраженной, что может приводить к искажению формируемой пространственной моды. Увеличение количества элементов позволяет более точно аппроксимировать требуемое непрерывное фазовое распределение и сформировать более выраженную структуру электромагнитного поля.

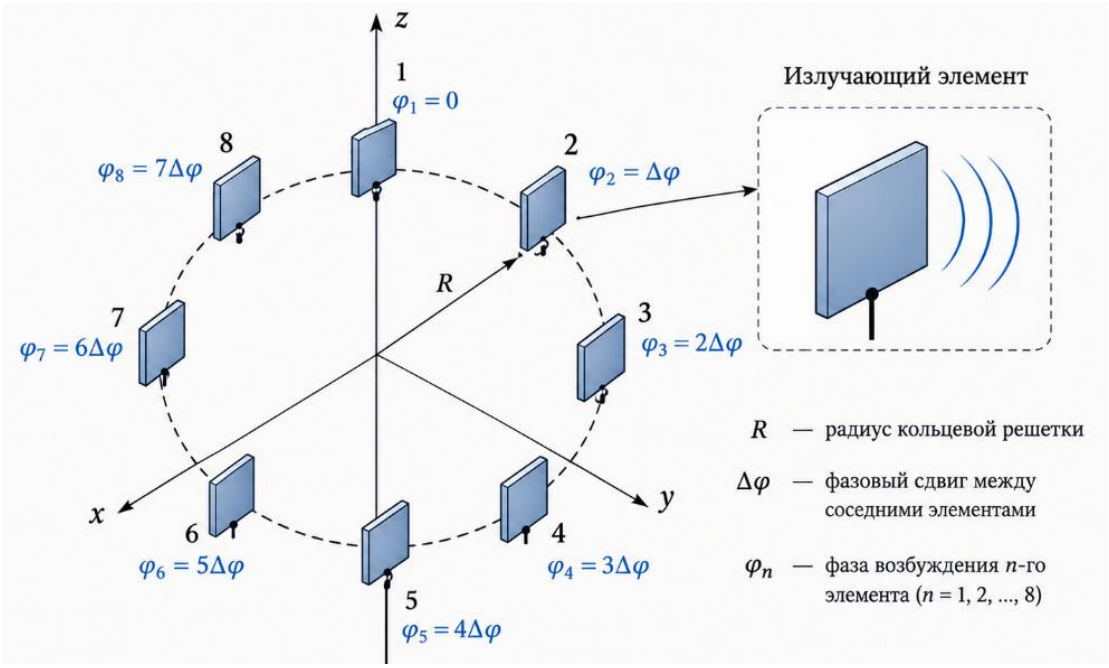
Другим важным параметром является величина фазового сдвига между соседними элементами. Изменяя данный параметр, можно управлять пространственной структурой формируемого поля и получать различные состояния орбитального углового момента. При этом необходимо учитывать взаимное влияние элементов антенной решетки и диаграмму направленности каждого отдельного излучателя.

В качестве одного из вариантов исследуемой структуры может быть использована кольцевая решетка, состоящая из восьми или шестнадцати излучающих элементов. Для каждого элемента задаётся индивидуальная фаза возбуждающего сигнала. В результате суммирования полей отдельных излучателей формируется результирующее распределение амплитуды и фазы в пространстве.

Схематическое представление рассматриваемой антенной системы приведено на рисунке. Анализ формируемого поля показывает, что при изменении закона фазирования изменяется структура фазового фронта электромагнитной волны. Для состояний с ненулевым орбитальным угловым моментом в центральной области поперечного сечения может формироваться характерная область пониженной интенсивности, окружённая областью повышенной интенсивности. При этом фазовое распределение изменяется по азимутальной координате.

Полученная структура позволяет рассматривать антенную решетку как управляемый генератор пространственных мод электромагнитного поля. В отличие от фиксированной антенны, изменение фаз возбуждения отдельных элементов обеспечивает возможность оперативного переключения между различными пространственными состояниями.

При практическом применении такого принципа необходимо учитывать конечное количество элементов, ограниченную ширину полосы частот, взаимное влияние излучателей и особенности диаграммы направленности. Кроме того, качество формирования пространственной моды зависит от геометрических размеров решетки и расстояния между её элементами.



Схематическое представление кольцевой антенной решетки для формирования электромагнитного поля с орбитальным угловым моментом

Таким образом, использование антенных решеток с управляемым фазовым распределением представляет собой перспективный подход к формированию электромагнитных волн с орбитальным угловым моментом. Модельное исследование показывает, что изменение количества элементов и фазового закона позволяет управлять пространственной структурой результирующего поля. Дальнейшее развитие работы может быть связано с численным моделированием конкретной антенной системы, исследованием влияния геометрических параметров решетки и оценкой возможности одновременного формирования и передачи нескольких пространственных мод.

Т. К. Жусупов
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛОЙ АНТЕННЫ НА ЕЕ ПАРАМЕТРЫ

Аннотация. Проведено электродинамическое моделирование различных конструкций в программном обеспечении MMANA-GAL в режиме «свободное пространстве» и «без потерь» с дальнейшим разделением потерь по месту их происхождения. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов с уже известными конструкциями. Выявлено, что применение зонтичной емкостной нагрузки и усложненного противовеса позволяет увеличить сопротивление излучения, одновременно с этим снизив потери в подстилающей поверхности и потери на согласование.
Ключевые слова: электрически малые антенны, зонтичная антенна, сопротивление излучения, сопротивление потерь, увеличение эффективности.
Для цитирования: Жусупов Т. К. Влияние конструкции электрически малой антенны на ее параметры // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

T. K. Zhusupov
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

THE INFLUENCE OF THE DESIGN OF AN ELECTRICALLY SMALL ANTENNA ON ITS PARAMETERS

Abstract: Electrodynamic modeling of various designs was carried out using the MMANA-GAL software in the “free space” and “lossless” modes, with subsequent separation of losses by their origin. A comparative analysis of the obtained results was carried out in relation to already known designs. The simulation results demonstrate that the use of an umbrella capacitive load and a more complex counterweight makes it possible to increase the radiation resistance, while simultaneously reducing losses in the underlying surface and matching losses.
Keywords: electrically small antennas, umbrella antenna, radiation resistance, loss resistance, increased efficiency.
For citation: Zhusupov T. K. The influence of the design of an electrically small antenna on its parameters // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Антенны, габаритные размеры которых много меньше длины рабочей волны, нашли широкое применение в составе носимых и мобильных радиостанций. При размерах много меньше четверти длины волны антенна называется электрически малой. Основным типом потерь таких антенн являются потери в подстилающей поверхности, потери в проводах антенны и изоляторах.

Для уменьшения потерь в подстилающей поверхности применяется система противовесов. Система противовесов представляет собой систему проводов, расположенных на подстилающей поверхности. Длина этих проводов должна быть больше, чем размер ёмкостной нагрузки, чтобы покрывать несколько большую площадь. Противовес предназначен для уменьшения тепловых потерь в подстилающей поверхности путем

экранирования ближнего поля антенны.

Количество и характер расположения противовесов зависит от габаритов и формы антенн. Чем больше количество проводов и плотнее они расположены, тем меньше потери в земле и больше излучаемая мощность.

Основополагающими параметрами для оценки и сравнения эффективности при исследовании антенн являются: коэффициент усиления, сопротивление излучения, сопротивление потерь полотна антенны, сопротивление потерь в подстилающей поверхности. Соотношение этих параметров определяют эффективность антенны.

В настоящий момент перспективным направлением развития антенной техники являются фрактальные антенны и кривые заполняющие пространство. Развитие направления фракталов и кривых заполняющих пространство связано с существенным изменением формы антенны с целью оптимального распределения тока по полотну антенны.

Метод определения сопротивления излучения и потерь

Для сравнительной оценки сопротивления излучения и потерь в проводнике антенны и в подстилающей поверхности было проведено в программе MMANA-GAL поэтапное моделирование с последовательным изменением условий расчета активного сопротивления:

1) в свободном пространстве без учета потерь в материале;

2) в свободном пространстве с учетом потерь в материале медь;

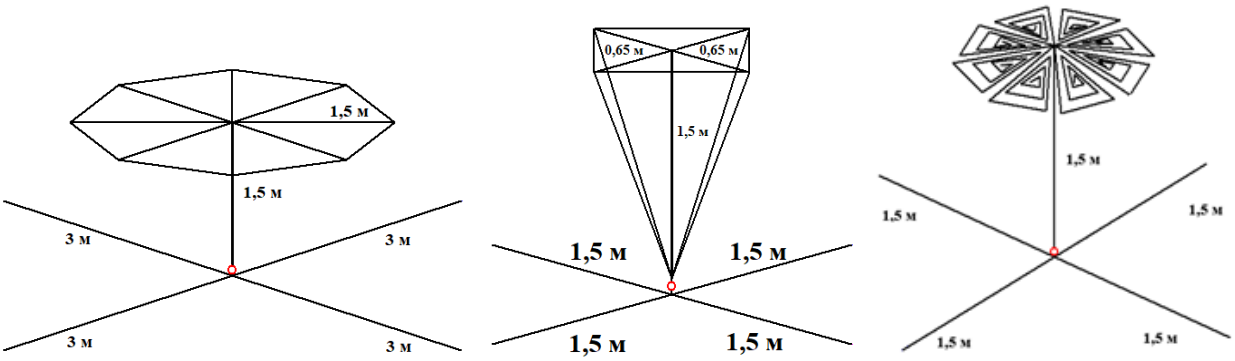
3) с параметрами сухой почвы (ε=13, σ=5 мСм/м) и с учетом потерь в материале медь.

Для определения сопротивления потерь в материале, от значения активного сопротивления в свободном пространстве с материалом медь отнималось значение активного сопротивления в свободном пространстве и без потерь.

Для определения потерь в подстилающей поверхности, от значения активного сопротивления с реальной землей и материалом медь отнималось значения активного сопротивление в свободном пространстве без потерь и сопротивление потерь в материале медь.

Сопротивление потерь на согласование на соответствующей частоте определялось путем деления реактивного сопротивления в диапазоне частот с реальной землей на значение добротности катушки индуктивности (100).

Конструкции антенн, рассматриваемых в работе представлены на рис. 1. Результаты моделирования представлены на рис. 2.



а *б* *в*

***Рис. 1**. Конструкции антенн, рассматриваемые в работе*

Результаты проведенного моделирования, которые представлены на рисунках, позволяют провести сравнительный анализ зонтичной и объемной антенны в поддиапазоне 1,5–5 МГц.

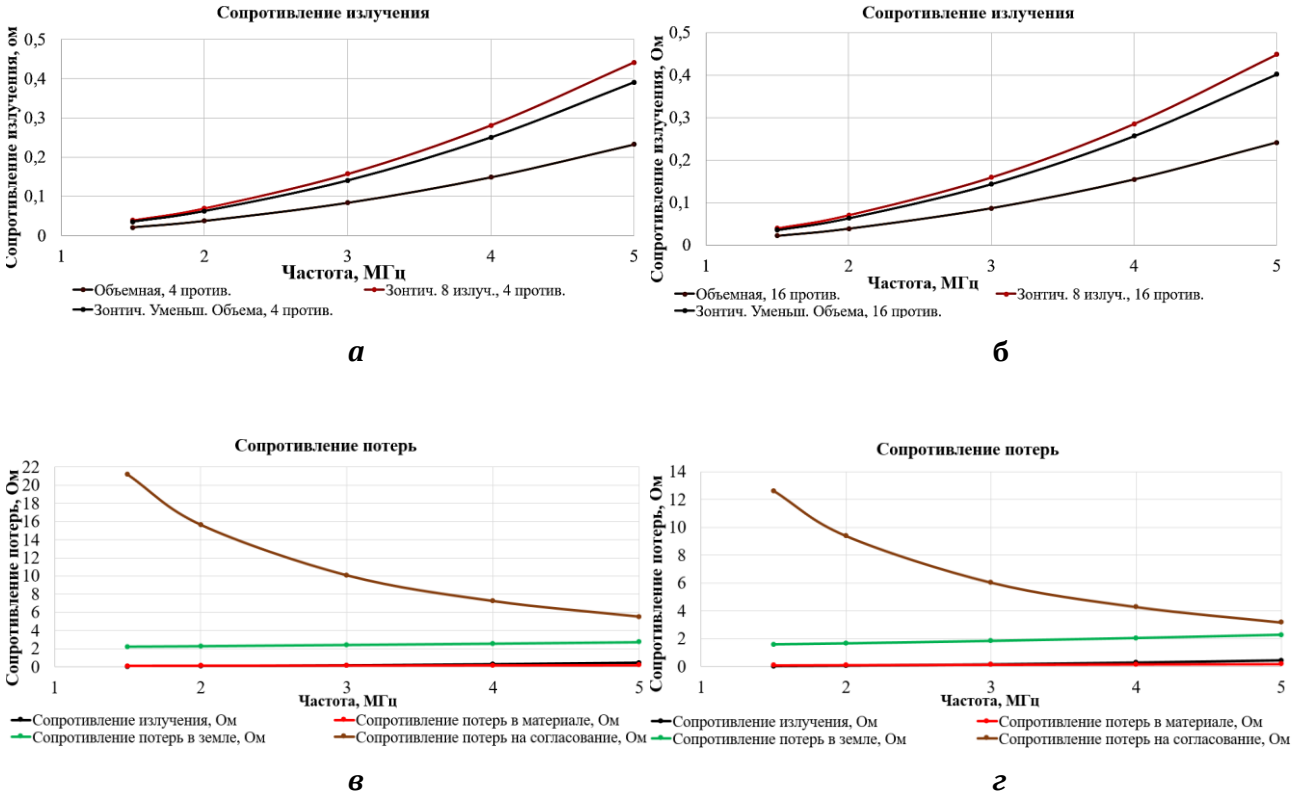


***Рис. 2**. Результаты моделирования сопротивления:*
а) излучения зонтичной и объемной антенны с 4 проводами в противовесе;
б) излучения зонтичной и объемной антенны с 16 проводами в противовесе;
в) потерь зонтичной антенны с 8 излучателями и с 4 проводами в противовесе
г) потерь зонтичной антенны с 8 излучателями и с 16 проводами в противовесе

Анализ данных рисунка (*а*, *б*) показывает, что конструкция емкостной нагрузки оказывает существенное влияние на распределение тока по полотну антенны. Равномерное распределение тока по полотну зонтичной антенны приводит к увеличению сопротивления излучения.

Анализ рисунка (*в*, *г*) подтверждает эффективность применения усложненной системы противовесов. Увеличение количества проводов в противовесе зонтичной антенны приводит к следующему:

1) происходит увеличение сопротивления излучения;

2) наблюдается снижение сопротивления потерь в подстилающей поверхности и потерь на согласование.

Снижение потерь в подстилающей поверхности за счет большего числа проводов в противовесе позволяет увеличить излучаемую мощность.

Таким образом, для увеличения эффективности излучения (сопротивления излучения) необходимо применение усложненной емкостной нагрузки и системы противовеса. Данная система позволяет уменьшить сопротивление потерь в подстилающей поверхности и потери на согласование, увеличить сопротивление излучения.

Н. С. Ламкова, Е. Д. Бычков
Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Российская Федерация

МЕТОД АДАПТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ГРАНИЦ ЛОКАЛЬНОЙ СТАЦИОНАРНОСТИ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДВАЖДЫ СЕЛЕКТИВНЫХ РАДИОКАНАЛАХ ВЫСОКОМОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Рассмотрен метод обнаружения границ локальной стационарности в высокомобильном радиоканале с изменяющейся многолучевой структурой. Решение опирается на изменение локального распределения энергии в плоскости «задержка – доплеровский сдвиг» и использует причинное скользящее окно. Потеря актуальности оценки состояния канала рассматривается как независимый результат. Сформирована модель переходов между режимами с прямой компонентой, появлением движущегося отражателя и богатой многолучевой средой. Метод предназначен для выделения интервалов, в которых статистика канала может считаться локально неизменной, и для своевременного обнаружения их границ.
Ключевые слова: нестационарный радиоканал, локальная стационарность, многолучевое распространение, доплеровский сдвиг, задержка, оценка состояния канала.
Для цитирования*:* Ламкова Н. С., Бычков Е. Д. Метод адаптивного обнаружения границ локальной стационарности в нестационарных дважды селективных радиоканалах высокомобильных объектов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

N. S. Lamkova, E. D. Bychkov
Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation

ADAPTIVE DETECTION OF LOCAL STATIONARITY BOUNDARIES IN NONSTATIONARY DOUBLY SELECTIVE HIGH-MOBILITY RADIO CHANNELS

Abstract. The paper considers a method for detecting local stationarity boundaries in a high-mobility radio channel with changing multipath structure. Unlike an approach based only on temporal correlation, this solution uses changes in the local delay Doppler energy distribution in a causal sliding window. Loss of channel state estimate validity is considered as a separate result. The authors propose a model of transitions between a direct component, an emerging moving reflector and a rich multipath environment. The method identifies intervals where channel statistics may be treated as locally unchanged and detects their boundaries in time.
Keywords: nonstationary radio channel; local stationarity; multipath propagation; Doppler shift; delay; channel state estimation.
For citation: Lamkova N. S., Bychkov E. D. Adaptive detection of local stationarity boundaries in nonstationary doubly selective high-mobility radio channels // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

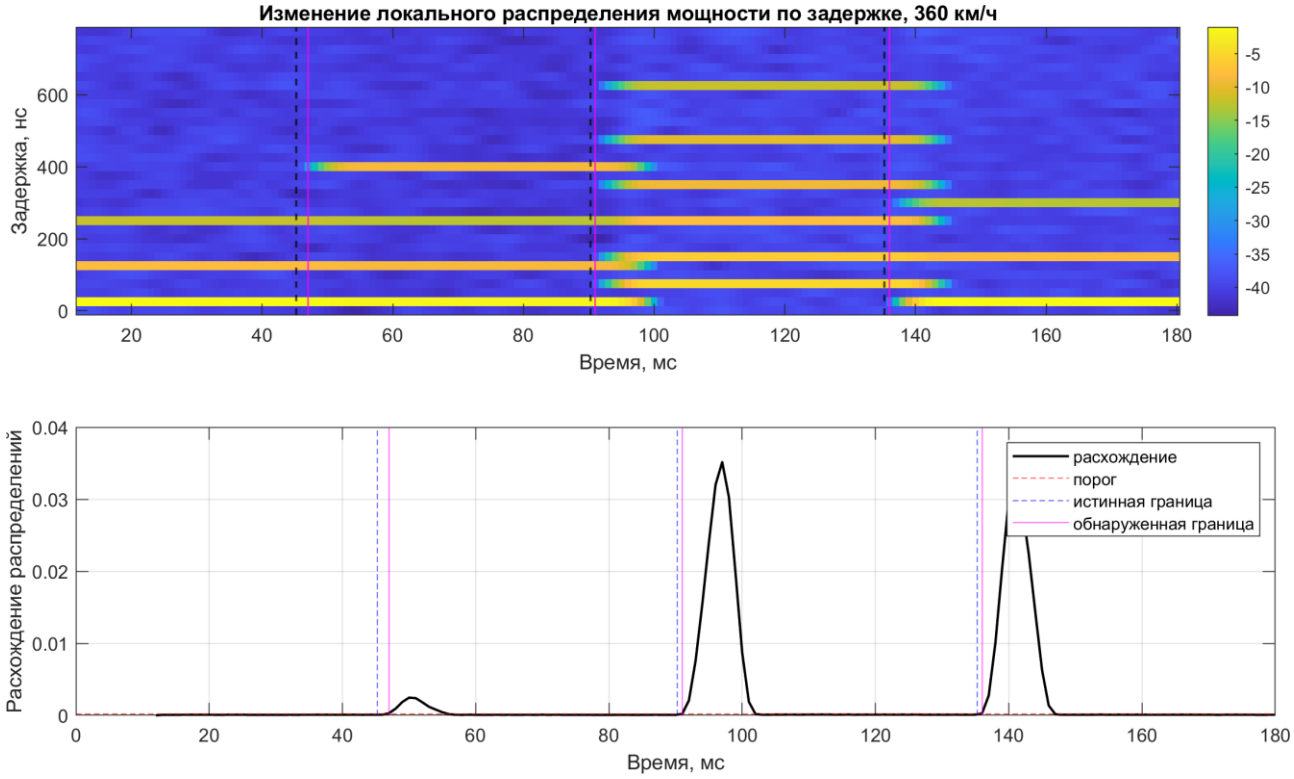
Высокая скорость движения объекта не является единственной причиной изменения радиоканала. Существенная перестройка его статистики возникает при появлении и исчезновении отражателей, перекрытии прямого пути и смене набора доминирующих многолучевых компонент. Поэтому стационарная модель применима лишь на ограни-

ченном интервале наблюдения. Задача работы состоит в обнаружении фактической границы такого интервала по наблюдаемой структуре канала, а не в назначении его длительности заранее.

Канал представлен совокупностью временно изменяющихся компонент с различными задержками, мощностями и доплеровскими сдвигами. В причинном скользящем окне откликов канала формируется локальная функция рассеяния, то есть распределение энергии в плоскости задержка–доплеровский сдвиг. Такая характеристика отражает структуру многолучевого распространения в текущем окне и допускает изменение статистики между окнами.

Признак границы образуется как расхождение Йенсена–Шеннона двух последовательных нормированных локальных функций рассеяния. Он увеличивается при изменении задержек, относительных мощностей либо доплеровских сдвигов компонент. Окно заканчивается в момент решения, поэтому будущие отсчёты не используются. Порог получают по 99% признака в начальной калибровочной области. После срабатывания вводят защитный интервал, равный длительности окна, что исключает несколько решений по одной физической перестройке.

Для проверки сформирована дискретная модель широкополосного дважды селективного радиоканала на несущей частоте 3,5 ГГц. Рассматриваются скорости 100, 250 и 360 км/час. В каждом прогоне последовательно задаются четыре физически различимых режима: канал с прямой компонентой, появление движущегося отражателя, богатая многолучевая среда без доминирующего прямого пути и восстановление прямой компоненты. Постоянные компоненты сохраняют фазовую непрерывность между режимами; переходы сглаживаются в течение 1 миллисекунды. Изменение структуры канала и результат причинного обнаружения при скорости 360 км/час показаны на рисунке.



Изменение локального распределения мощности по задержке и причинное обнаружение границ при скорости 360 км/ч

Длительность окна составляет 12 мс, период его сдвига – 1 мс, отношение сигнал–шум при зондировании – 25 дБ. На каждую скорость выполнено 100 независимых реализаций с тремя известными границами модели, то есть по 300 размеченных событий. Истинные моменты переходов не используются детектором и применяются только после принятия решений для расчёта вероятности правильного обнаружения, вероятности ложной тревоги и задержки.

Проверка чувствительности порога выполнена для множителей 1, 2, 5 и 10 от 99%. На 60 независимых калибровочных реализациях и стационарных профильных моделях радиоканала рабочим выбран множитель 2: он сохранил вероятность правильного обнаружения 1,000, не дал ложных событий и обеспечил минимальную среднюю задержку. На независимой тестовой выборке из 100 реализаций на скорость вероятность правильного обнаружения составила 1,000; 95% доверительный интервал равен от 0,987 до 1,000. Ложных событий не зафиксировано; верхняя 95% граница их вероятности составляет 0,00348.

Средняя задержка обнаружения для скоростей 100, 250 и 360 км/час равна соответственно 1,117, 1,083 и 1,100 миллисекунды. Нормированная ошибка ранее полученной оценки состояния канала возрастает около физических границ: соответственно с 0,039 до 0,053, с 0,201 до 0,266 и с 0,384 до 0,505. Этот показатель не включён в решающее правило: в богатой, но локально стационарной среде его абсолютный уровень может быть высоким вследствие обычной доплеровской динамики.

Предложенный метод выявляет смену статистического режима и область применимости текущей модели. На стационарных профильных моделях без заданных границ максимальная верхняя 95% граница вероятности ложной тревоги составила 0,014. Он не выбирает параметры передачи или горизонт прогнозирования и не дублирует работы по адаптации системы связи и сопровождению канала.

К. А. Майненгер
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОЙ АНТЕННЫ В СРЕДЕ С ПОТЕРЯМИ

Аннотация: Представлены результаты экспериментальных измерений уровня сигнала с выхода приемной магнитной ферритовой антенны, располагаемой в различных средах. Полученные результаты показали, что размещение антенны над или непосредственно на подстилающей поверхности обеспечивают близкий друг к другу уровень сигнала с выхода антенны, а ее расположение под подстилающей поверхностью, т.е. в среде с потерями, уменьшает уровень сигнала на величину от 1,0 до 6,1 дБ. Данные результаты носят частный характер и справедливы для проведенного эксперимента, однако общие закономерности могут быть использованы при разработке приемных радиотрактов, построенных с использованием малогабаритных антенн магнитного типа.
Ключевые слова: ферритовая магнитная антенна, среда с потерями, подстилающая поверхность, уровень сигнала.
Для цитирования: Майненгер К. А. Результаты экспериментальных измерений магнитной антенны в среде с потерями // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

K. A. Maynenger
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

EXPERIMENTAL MEASUREMENT RESULTS OF A MAGNETIC ANTENNA IN A LOSSY MEDIUM

Abstract: This paper presents the results of experimental measurements of the signal level at the output of a receiving ferrite magnetic antenna placed in various media. The results show that placing the antenna above or directly on the underlying surface provides a similar signal level at the antenna output, while positioning the antenna beneath the surface (i.e., in a lossy medium) reduces the signal level by 1.0 to 6.1 dB. These results are specific to the conducted experiment; however, the general patterns observed can be utilized in the development of receiving radio paths employing small-sized magnetic antennas.
Keywords: ferrite magnetic antenna, lossy medium, underlying surface, signal level.
For citation: Maynenger K. A. Experimental measurement results of a magnetic antenna in a lossy medium // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Антенны можно помещать в различные материальные среды, такие, как почва, морская или пресная вода, арктический лед, плазма или живой организм в целях связи, телеметрии, разведки или диагностики. Простые излучатели, приемные или передаю-

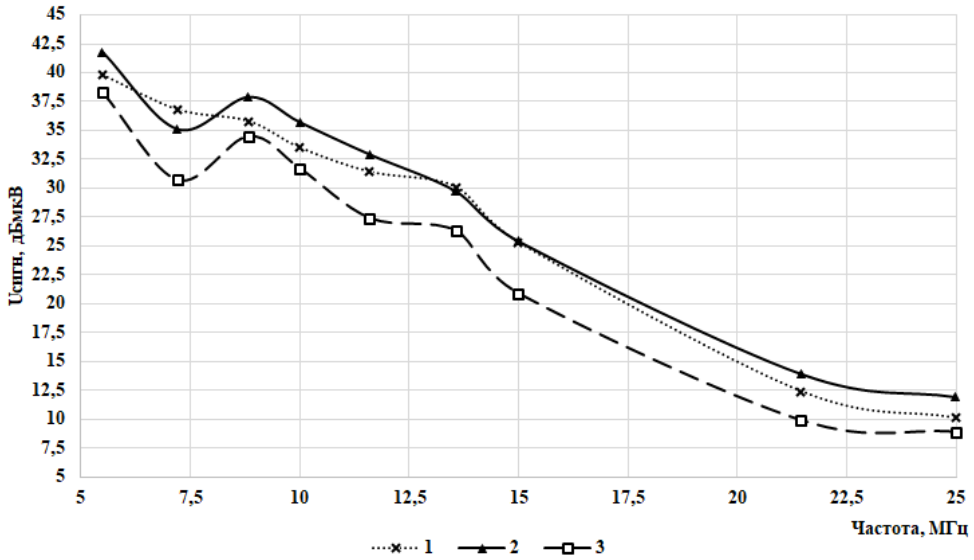
щие, могут использоваться в этих средах отдельно или в составе антенной решетки. Такими элементами могут являться несимметричные вибраторы, диполи, рамочные антенны, полукольцевые рамки или ферритовые антенны, помещенные над проводящей поверхностью земли. Характеристики антенных элементов или антенных решеток, когда они окружены материальной средой, как известно сильно отличаются от их характеристик в воздухе, вследствие влияния электрических свойств материала среды и даже ее формы или размеров. Особенности размещения антенн на объекте также определяют специфику схемотехнических и конструктивных решений.

Основываясь на литературе, посвященной исследованию электрических свойств подстилающей среды установлено, что данные о комплексной диэлектрической проницаемости крайне разрознены и носят частный характер, а измерения в большинстве случае, проводились для более высоких частот, что затрудняет прогнозирование оценки влияния подстилающей среды на изменение характеристик антенны и распространение радиоволн в КВ диапазоне частот. В связи с чем в рамках экспериментальных исследований был проведен ряд измерений магнитной антенны, размещаемой в разных средах. Магнитные антенны, выполненные посредством ферритовых сердечников, обладают рядом преимуществ перед антеннами электрического типа. В частности, благодаря ферритам такие антенны имеют небольшие габариты, они менее восприимчивы к сильной электрической составляющей поля помех от близлежащих источников и поэтому способны обеспечить лучшее отношение сигнал/шум в сложной электромагнитной обстановке.

Использование ферритового сердечника и встроенного в магнитную антенну усилителя позволяет сократить габариты, сделать антенну низкопрофильной и обеспечить требуемую чувствительность во всем рабочем диапазоне частот. Использованная в эксперименте магнитная ферритовая антенна представляла собой ферритовый стержень с магнитной проницаемостью 100, длинной 150 мм, диаметром 10 мм и намоткой в 10 витков по всей длине ферритового стержня, выполненной проводом ПЭТВ-2 диаметром 1 мм. Ферритовый стержень размещался в изолирующем диэлектрике (пластиковый корпус), который уменьшал утечку тока из антенны в соприкасающейся с ней проводящую среду. Усилитель антенны реализован на полевых транзисторах 2SK544E. Питание усилителя антенны реализовано с помощью батареи 6 В.

Целью проводимых измерений являлась количественная оценка уровня сигнала с выхода ферритовой антенны, располагаемой на высоте 1 метр от поверхности земли; на поверхности земли и под землей на глубине 0,35 м (т.е. в среде с потерями). Результаты эксперимента приведены на рисунке.

Результаты, приведенные на рисунке, позволяют сделать вывод, что наибольшие уровни сигнала в точке приема наблюдаются при размещении антенны на высоте 1 м от поверхности земли и при размещении антенны непосредственно на поверхности земли. Для этих двух случаев уровень сигнала при изменении места расположения антенны практически соизмерим. Для первого случае значения уровня сигнала в точке приема варьируется от 10,1 до 39,8 дБ в зависимости от частоты, а для второго случая варьируется от 11,9 до 41,8 дБ в зависимости от частоты. Размещение антенны под подстилающей поверхностью показало наименьший уровень сигнала, который изменялся от 6,6 до 38,3 дБ. Что на 1,0–6,1 дБ (в зависимости от частоты) меньше от первых двух способов размещения. Данные результаты могут быть объяснены следующим образом – ферритовая магнитная антенна реагирует на магнитную составляющую электромагнитного поля, а не на электрическую, для магнитного поля размещение антенны на подстилающей поверхности и в воздухе (т.е. на высоте 1 метр) является практически одинаковым условием, однако перемещение антенны в среду с потерями (почву) не существенно, но все-таки ухудшает уровень сигнала на единицы дБ.



Графическое представление результатов эксперимента:
1 – антенна располагается на высоте 1 метр от поверхности земли;
2 – антенна располагается непосредственно на земле;
3 – антенна располагается под землей

Результаты, приведенные на рисунке, позволяют сделать вывод, что наибольшие уровни сигнала в точке приема наблюдаются при размещении антенны на высоте 1 м от поверхности земли и при размещении антенны непосредственно на поверхности земли. Для этих двух случаев уровень сигнала при изменении места расположения антенны практически соизмерим. Для первого случае значения уровня сигнала в точке приема варьируется от 10,1 до 39,8 дБ в зависимости от частоты, а для второго случая варьируется от 11,9 до 41,8 дБ в зависимости от частоты. Размещение антенны под подстилающей поверхностью показало наименьший уровень сигнала, который изменялся от 6,6 до 38,3 дБ. Что на 1,0–6,1 дБ (в зависимости от частоты) меньше от первых двух способов размещения.

Данные результаты могут быть объяснены следующим образом – ферритовая магнитная антенна реагирует на магнитную составляющую электромагнитного поля, а не на электрическую, для магнитного поля размещение антенны на подстилающей поверхности и в воздухе (т.е. на высоте 1 метр) является практически одинаковым условием, однако перемещение антенны в среду с потерями (почву) не существенно, но все-таки ухудшает уровень сигнала на единицы дБ. Последнее также может быть обосновано тем, что, во-первых, подстилающая поверхность может в некотором приближении действовать как проводящий экран для магнитного поля, т.к. индуцированные в подстилающей поверхности вихревые токи могут создавать вторичное поле, которое располагается против первичного, что в совокупности может приводить к ослаблению поля. На частотах ниже 1 МГц на этой же глубине этот эффект может быть менее заметен, но начиная с 5 МГц может вносить потери на величину 2–4 дБ. Во-вторых, к измеренному сигналу могут добавляться потери связанные с затуханием волны проходящей через проводящую среду.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер регистрации проекта 125013101211-4).

С. А. Останин[1,2], А. В. Касаткин[1], В. В. Щербинин[1,3], Г. В. Грибова[2]
[1]АО «БСКБ «Восток», Барнаул, Российская Федерация
[2]Алтайский государственный медицинский университет,
Барнаул, Российская Федерация
[3]Алтайский государственный университет, Барнаул, Российская Федерация

ПАССИВНАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ ДЕТЕКТОРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА АТОМАХ РИДБЕРГА

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения чувствительности детектирования СВЧ-полей. Целью является разработка физико-математической модели высокочувствительного детектора СВЧ-поля, использующего внутрирезонаторное размещение атомной среды. Полученные результаты показывают, что предложенный метод обеспечивает геометрическое (в ≈19 раз) и нелинейное (в ≈$2{,}3\cdot10^4$ раз) усиление, достигая чувствительности 0,05–0,1 нВ·м$^{-1}$·Гц$^{-1/2}$ и улучшение контраста сигнала в 10^5 раз по сравнению с внерезонаторными аналогами.
Ключевые слова: атомы Ридберга, электромагнитно-индуцированная прозрачность, внутрирезонаторная лазерная спектроскопия, детектор СВЧ-поля, квантовое сенсорное устройство.
Для цитирования: Останин С. А., Касаткин А. В., Щербинин В. В., Грибова Г. В. Пассивная антенна на основе детектора электромагнитного поля на атомах Ридберга // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

S. A. Ostanin[1,2], A. V. Kasatkin[1], V. V. Shcherbinin[1,3], G. V. Gribova[2]
[1]JSC "BSDB "VOSTOK", Barnaul, Russian Federation
[2]Altai State Medical University, Barnaul, Russian Federation
[3]Altai State University, Barnaul, Russian Federation

PASSIVE ANTENNA BASED ON A RYDBERG ATOM ELECTROMAGNETIC FIELD DETECTOR

Abstract. The relevance of the research is due to the need to increase the sensitivity of microwave field detection. The aim of the work is to develop a physical and mathematical model of a highly sensitive microwave field detector using intra-cavity placement of an atomic medium. The results show that the proposed method provides geometric (≈19 times) and nonlinear (≈$2{,}3\cdot10^4$ times) amplification, achieving a sensitivity of 0,05–0,1 nV·m^{-1}·Hz$^{-1/2}$ and a signal contrast improvement of 10^5 times compared to external-cavity analogs.
Keywords: Rydberg atoms, electromagnetically induced transparency, intracavity laser spectroscopy, microwave field detector, quantum sensing device.
For citation: Ostanin S. A., Kasatkin A. V., Shcherbinin V. V., Gribova G. V. Passive antenna based on a Rydberg atom electromagnetic field detector // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Современные методы детектирования сверхвысокочастотных электромагнитных полей на основе атомов Ридберга представляют значительный интерес в радиофизике и квантовой метрологии. Они обеспечивают высокую точность измерений благодаря возможности прямой калибровки по фундаментальным физическим константам. Такие

детекторы поля используют в качестве сверхширокополосных пассивных антенн с высокой чувствительностью к внешнему полю и малыми размерами (порядка нескольких сантиметров). Однако чувствительность существующих пассивных антенн на основе атомов Ридберга ограничена однократным прохождением зондирующего излучения через атомную среду, что препятствует полноценному использованию нелинейных эффектов для усиления слабых сигналов и, как следствие, повышению эффективности пассивных антенн.

В данной работе предлагается объединить преимущества ридберговской электрометрии и внутрирезонаторной лазерной спектроскопии. Метод внутрирезонаторной лазерной спектроскопии предполагает размещение исследуемой среды внутри резонатора лазера, что обеспечивает многократное взаимодействие излучения с веществом и экспоненциальное усиление сигнала за счет высокой чувствительности выходной мощности лазера к изменению внутрирезонаторных потерь вблизи порога генерации. Цель исследования – разработка физико-математической модели такого детектора и количественная оценка ожидаемого повышения чувствительности по сравнению с внерезонаторными аналогами.

В качестве атомной среды выбраны пары ^{87}Rb. Для возбуждения ридберговских состояний используется трехфотонная схема:

1. 780 нм: Пробное поле связывает основное состояние $|g\rangle$ с первым возбужденным состоянием $|e\rangle$. Его поглощение модулируется эффектом электромагнитно-индуцированной прозрачности.

2. 480 нм: Управляющее поле создает когерентную суперпозицию состояний $|g\rangle$ и $|r\rangle$ через промежуточное состояние $|e\rangle$, обеспечивая условие электромагнитно-индуцированной прозрачности.

3. 1529 нм: Дополнительное поле оптимизирует условия электромагнитно-индуцированной прозрачности, сужая линию резонанса и увеличивая когерентное время жизни ридберговского состояния.

Измеряемое сверхвысокочастотное поле резонансно связывает два ридберговских уровня $|r\rangle$ и $|r'\rangle$, вызывая расщепление резонанса электромагнитно-индуцированной прозрачности.

Восприимчивость пробного поля в трехуровневой Λ-схеме с дополнительным сверхвысокочастотным переходом $|r\rangle \rightarrow |r'\rangle$ описывается выражениями, полученными из оптических уравнений Блоха. Присутствие сверхвысокочастотного поля модифицирует восприимчивость, изменяя коэффициент поглощения пробного поля. Частота Раби сверхвысокочастотного перехода определяется дипольным моментом ридберг-ридберговского перехода, который масштабируется как n^2, где n – главное квантовое число.

При размещении атомной среды внутри резонатора пробного лазера внутрирезонаторные потери состоят из постоянных потерь и потерь, обусловленных поглощением на ридберговском переходе. Внутрирезонаторное усиление описывается множителем, зависящим от длины резонатора и длины кюветы с атомами.

Динамика лазера описывается скоростными уравнениями для одномодового лазера, учитывающими инверсию населенностей, плотность фотонов в резонаторе, скорость накачки и спонтанной релаксации. Выходная мощность лазера вблизи порога генерации демонстрирует высокую чувствительность к изменению внутрирезонаторных потерь.

Сигнал на выходе фотоприемника пропорционален выходной мощности лазера. Относительное изменение выходной мощности связано с изменением внутрирезонаторных потерь, вызванных сверхвысокочастотным полем. Чувствительность по напряженности поля определяется отношением изменения напряженности к спектральной плотности шума фототока. Чувствительность, ограниченная дробовым шумом, является фундаментальным пределом.

Для достижения максимальной чувствительности предлагается использовать вертикально-излучающий лазер с внешним резонатором на 780 нм. Такой лазер обладает низкой относительной интенсивностью шума, широким динамическим диапазоном управления накачкой, компактностью и механической стабильностью.

Для численных оценок использованы следующие экспериментальные параметры: длина волны 780 нм; оптическая длина резонатора 0,1 м; длина кюветы 0,05 м; плотность атомов 10^12 $м^{-3}$; главное квантовое число 50; дипольный момент перехода 10^{-30} Кл·м; коэффициент поглощения 0,1 $м^{-1}$; выходная мощность 10 мВт; эффективность 0,9.

Время жизни фотона в резонаторе и добротность резонатора были рассчитаны. Число проходов через атомную среду составляет около 19, что соответствует эффективной оптической длине взаимодействия в ≈19 раз превышающей геометрическую длину кюветы. Фактор нелинейного усиления вблизи порога генерации (при работе на 1% выше порога) составляет $\approx 2{,}3 \cdot 10^4$. Таким образом, внутрирезонаторное размещение атомной среды обеспечивает суммарное усиление чувствительности примерно в $4{,}4 \cdot 10^5$ раз по сравнению с однопроходной схемой.

Заключение

Разработана физико-математическая модель высокочувствительного детектора СВЧ-поля на основе внутрирезонаторной ридберговской электрометрии. Размещение атомной среды внутри резонатора пробного лазера обеспечивает геометрическое усиление (≈19 раз) и нелинейное усиление ($\approx 2{,}3 \cdot 10^4$ раз). Ожидаемая чувствительность составляет 0,05–0,1 $нВ \cdot м^{-1} \cdot Гц^{-1/2}$ в диапазоне 100 МГц – 14 ГГц, что на 4–5 порядков превышает чувствительность классических приемников и на 1–2 порядка – современных ридберговских электрометров. Достигается улучшение контраста сигнала примерно в 10^5 раз по сравнению с внерезонаторными аналогами. Ключевыми факторами, определяющими предельную чувствительность, являются дробовой шум фотонов, шум интенсивности лазера, спектральная ширина ридберговского перехода и добротность оптического резонатора. Разработанная модель служит основой для создания нового класса пассивных сверхвысокочувствительных внутрирезонаторных антенн на атомах Ридберга.

И. В. Петров[1,2], А. А. Комаров[1], П. В. Луферчик[1], А. И. Шивейко[1,2], А. А. Репин[1]
[1]АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»
Красноярск, Российская Федерация
[2]Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДЕТЕКЦИЯ СИГНАЛОВ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ С ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ

Аннотация. При проектировании логики работы станций спутниковой связи с децентрализованным управлением возникает потребность в алгоритмах анализа частотного ресурса. Предлагается использовать метод энергетической детекции. Для снижения вероятности пропуска детектирования анализируются распределения энергии и модуля амплитуды шума и смеси сигнал-шум в частотной области. Рассматривается критерий выбора порога детектирования. Разработана модель детектора с весовыми коэффициентами. Представлены предварительные результаты моделирования работы данного детектора.
Ключевые слова: энергетическая детекция, плотность вероятности, весовые окна, критерий Неймана-Пирсона, математическая статистика, частотное разделение.
Для цитирования: Петров И. В., Комаров А. А., Луферчик П. В., Шивейко А. И., Репин А. А. Энергетическая детекция сигналов в децентрализованных системах связи с частотным разделением // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

I. V. Petrov[1,2], A. A. Komarov[1], P. V. Luferchik[1], A. I. Shiveiko[1,2], A. A. Repin[1]
[1]JSC « Scientific Production Enterprise «Radiosviaz », Krasnoyarsk, Russian Federation
[2]Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

ENERGY DETECTION OF SIGNALS IN DECENTRALIZED FREQUENCY-DIVISION COMMUNICATION SYSTEM

Abstract. The design of operational logic for satellite communication stations controlled in decentralized manner necessitates algorithms for frequency resource analysis. This paper proposes the use of an energy detection method. To reduce the probability of missed detection, we analyze the energy and magnitude distributions of noise and signal-plus-noise in the frequency domain and evaluate a criterion for detection threshold selection. Furthermore, we develop a weighted detector model and present preliminary simulation results demonstrating its performance.
Keywords: energy detection, probability density, weight windows, Neyman-Pearson criterion, mathematical statistics, FDMA.
For citation: Petrov I. V., Komarov A. A., Luferchik P. V., Shiveiko A. I., Repin A. A. Energy detection of signals in decentralized frequency-division communication systems // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

При проектировании децентрализованной системы связи с частотным разделением возникает потребность в определении состояния каналов в выделенной полосе частот. Среди различных методов выделяется энергетическая детекция сигнала по уровню в частотной области, нетребовательная к вычислительным ресурсам и априорной информации, заложенной в сигнал, а также обеспечивающая быстрый отклик. Од-

нако работоспособность данного метода напрямую зависит от выбора порога детектирования. Изменение величины порога влияет на основные метрики детекции

– вероятность ложного срабатывания (P_{fa});
– вероятность пропуска детекции (P_{md}),

и их дополнения соответственно:

– вероятность правильного отклонения (P_{cr});
– вероятность детектирования (P_d).

Инструментом для достижения компромисса значений метрик может стать критерий Неймана-Пирсона. Его суть заключается в том, чтобы зафиксировать значение P_{md} на приемлемом уровне α и найти способ минимизировать P_{fa}.

Если рассматривать выход преобразования Фурье, то модули отдельных значений белого шума будут иметь распределение Рэлея, а их квадрат, то есть спектральная плотность энергии – распределение χ^2 с двумя степенями свободы (экспоненциальное с $\lambda = ½$). Ввиду того, что отсчеты белого шума некоррелированны между собой, данное распределение по центральной предельной теореме при усреднении стремится к нормальному. Модули отдельных значений смеси сигнала и белого шума подчиняются распределению Райса, а квадраты нецентральному χ^2. В зависимости от степени корреляции отсчетов сигнала будет меняться скорость приближения к нормальному распределению при усреднении. Влияние выбора значения порога детекции при допущении, что количество отсчетов в измеряемой полосе бесконечно велико, оценивается величиной P_{fa} и P_{md} (рис. 1).

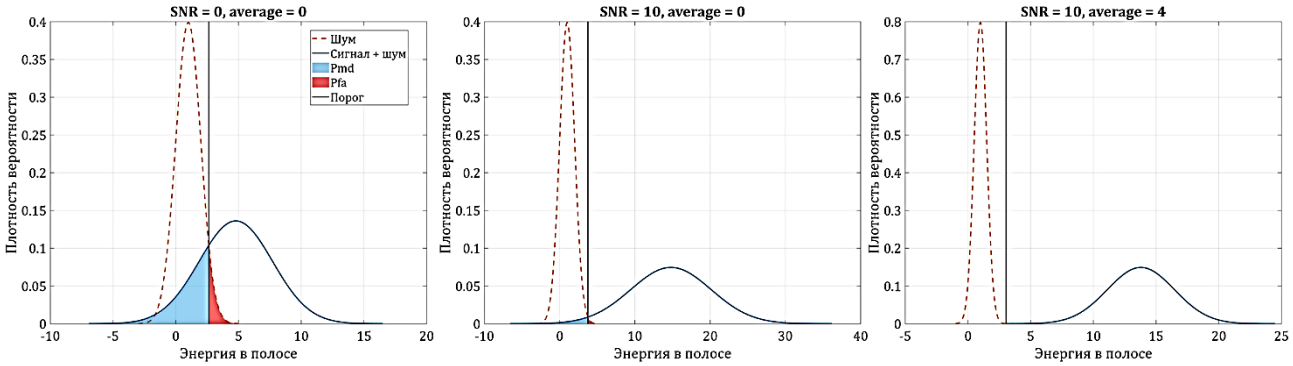


Рис. 1. *Пример распределений энергии в полосе*

Исследуемая модель детектора анализирует N отсчетов в частотной области, разделенной на M каналов и M-1 защитных интервалов. Соответственно число отсчетов шумовой полосы и смеси сигнал-шум каждого из M каналов ограничено N. Ввиду описанных выше особенностей при усреднении мы получим нормальное распределение шума, рассчитанное по отсчетам в защитных интервалах и распределение Райса (или χ^2, если это распределение спектральной плотности энергии) смеси сигнал-шум в каждом отдельном канале, вырождающееся в нормальное распределение при увеличении количества усредняемых спектров. При этом величина изменения P_{fa} и P_{md} при сдвиге порога детектирования есть не что иное, как значение плотности вероятности соответствующего распределения в точке, равной новому значению порога. Данную особенность необходимо учитывать при минимизации суммы P_{fa} и P_{md} как важного критерия работоспособности детектора. При этом последствия пропуска детекции являются более опасными для системы (риск начать передачу на занятой частоте), чем ложное срабатывание, в связи с чем необходим эмпирический выбор весовых коэффициентов для составления функции минимизации.

Выбор величины порога детекции является не единственным способом повышения эффективности обнаружения сигнала. Введение вектора весовых коэффициентов понижает влияние шумовой составляющей на математическое ожидание смеси сигнал-шум, уменьшая вероятность ошибочных решений. Поскольку целью является не извлечение информации, а лишь определение наличия сигнала в соответствующей полосе частот, взвешивание применяется в частотной области для каждого из M каналов.

Для проведения исследования влияния статистических свойств анализируемых выборок и частотного взвешивания на качественные метрики детектора была разработана модель, включающая имитатор сигнала с частотным мультиплексированием, канал с белым гауссовским шумом, блок цифрового понижения тактовой частоты, быстрое преобразование Фурье и детектор сигнала.

Данная модель позволит определить оптимальные соотношения длины Фурье N, числа усредняемых спектров, величины порога при разных отношениях сигнал–шум для достижения наименьших значений P_{fa} и P_{md}.

На данный момент установлено, что применение частотного взвешивания дает выигрыш примерно 0,64 дБ (рис. 2).

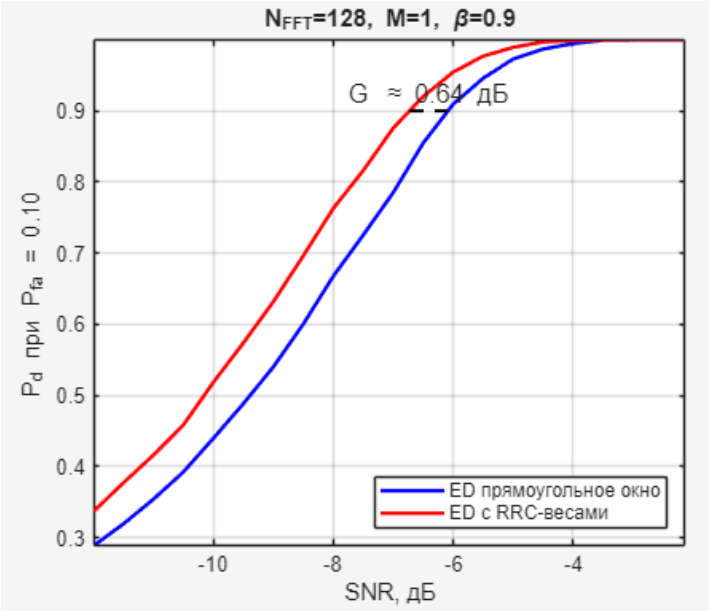


Рис. 2. *Сравнение детектора с частотным взвешиванием*

В дальнейшем планируется провести проверку разработанной модели на реальных данных, полученных с абонентской станции: построить эмпирические распределения энергии шума и смеси сигнал–шум в частотной области, сформировать критерий оптимизации порога детектирования с учетом различной значимости вероятностей ложного срабатывания и пропуска, а также исследовать влияние весовых функций при интегрировании модуля спектральной плотности сигнала. Это позволит определить оптимальные значения длины БПФ, числа усредняемых спектров и порога детектирования для различных отношений сигнал–шум, оценить устойчивость предложенного детектора к реальным условиям приема и сравнить достигаемый выигрыш от частотного взвешивания с известными подходами к энергетической детекции.

И. В. Романов
Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова
Москва, Российская Федерация

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СРЕЗЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2-СЛОЯ НАД ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИЕЙ «ЭЛЕКТРОУГЛИ»

Аннотация. Совместная работа аппаратуры ионосферных наблюдений наземного и космического размещения в режиме синхронного излучения и приёма сигналов зондирования обеспечивает получение дополнительной информации о распределении критических частот F2-слоя ионосферы в окрестности размещения наземных ионосферных пунктов. Эта информация может быть использована для расширения границ мониторинга и повышения точности прогноза параметров ионосферной плазмы при ассимиляции данных в ионосферную модель. В работе приводится описание экспериментов по измерению профилей (срезов) критических частот максимума ионосферы. Горизонтальные профили критических частот получены с использованием наземного ионозонда вертикального радиозондирования на ионосферном пункте «Электроугли» совместно с аппаратурой внешнего радиозондирования ионосферы с космических аппаратов «Ионосфера-М».
Ключевые слова: трансионосферное радиозондирование, ионозонд, ионосфер, критические частоты, плотность электронов.
Для цитирования: Романов И. В. Горизонтальные срезы критической частоты F2-слоя над ионосферной станцией «Электроугли» // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

I. V. Romanov
Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russian Federation

HORIZONTAL PROFILES OF THE F2 LAYER CRITICAL FREQUENCY OVER THE ELEKTROUGLI IONOSPHERIC STATION

Abstract. The coordinated operation of ground-based and spaceborne ionospheric observation instruments in a synchronous transmit–receive mode of sounding signals yields additional information on the distribution of F2 layer critical frequencies in the vicinity of ground-based ionospheric stations. This information can be used to extend monitoring coverage and improve the accuracy of ionospheric plasma parameter prediction when assimilated into an ionospheric model. The paper describes experiments on measuring profiles (cross-sections) of the critical frequencies at the ionospheric maximum. Horizontal critical frequency profiles were obtained using a ground-based vertical sounding ionosonde at the Elektrougli ionospheric station in conjunction with external ionospheric radio sounding equipment onboard the Ionosphere-M spacecraft.
Keywords: transionospheric radio sounding, ionosonde, ionosphere, critical frequencies, electron density.
For citation: Romanov I. V. Horizontal profiles of the F2 layer critical frequency over the Elektrougli ionospheric station // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В настоящее время в России ведётся мониторинг состояния ионосферы на основе эксплуатации наземного и космического сегментов ионосферной системы наблюдений. Наземный сегмент включает в себя сеть наземных ионосферных пунктов, включающих

ионозонды вертикального радиозондирования. Измерения параметров плазменных слоёв ниже главного максимума ионосферы проводятся в стационарном географическом месте в течение продолжительного промежутка времени. Космический сегмент использует бортовые ионозонды, размещаемые на космических аппаратах «Ионосфера-М». Космические измерения позволяют вести глобальный мониторинг ионосферы выше главного максимума. Далее данные ионосферного мониторинга ассимилируются в ионосферную модель, на основе которой строится прогноз состояния ионосферы.

Целью данной работы является развитие методов ионосферных измерений на основе организации совместной работы аппаратуры радиозондирования ионосферы наземного и космического размещения для увеличения пространственного разрешения ионосферных измерений.

В рамках работы проводились эксперименты на наземном ионосферном пункте «Электроугли» (Московская область) во время пролёта космических аппаратов «Ионосфера-М». Если сигналы радиозондирования, излученные с борта космического аппарата, принимаются наземной аппаратурой, то такие сеансы принято называть прямым трансионосферным радиозондированием. В обратном случае, т. е. если зондирующие сигналы от передатчика на Земле принимаются на космическом аппарате, такие сеансы называются обратным трансионосферным радиозондированием. Излучение и приём сигналов проводятся в едином диапазоне частот 1–20 мегагерц, с периодом повторения сеансов 10 секунд. Такое время позволяет измерять параметры главного максимума ионосферы с горизонтальным пространственным разрешением около 100 километров на дистанции 2 тыс. километров. Экспериментальные сеансы проводятся в вечернее, ночное, утреннее и дневное время. Такой подход позволяет исследовать закономерности распространения сигналов при различных условиях состояния ионосферы.

Во время обработки дисперсионных кривых на ионограммах (рис. 1) при одном пролёте космического аппарата над ионосферным пунктом «Электроугли» измеряют минимально и максимально наблюдаемые частоты, т. е. крайние частоты вблизи плазменных частот слоёв ионосферы. Обычно при приближении к этим частотам дисперсионные кривые на ионограммах изгибаются. При больших значениях возвышения космического аппарата над горизонтом эти частоты соответствуют критическим частотам максимума ионосферы непосредственно над ионосферным пунктом, а также в области пересечения зондирующего сигнала и максимума ионосферы при наклонном распространении. При наличии горизонтального градиента концентрации электронов в ионосфере частоты, полученные разными методами в разных областях ионосферы, могут не совпадать.

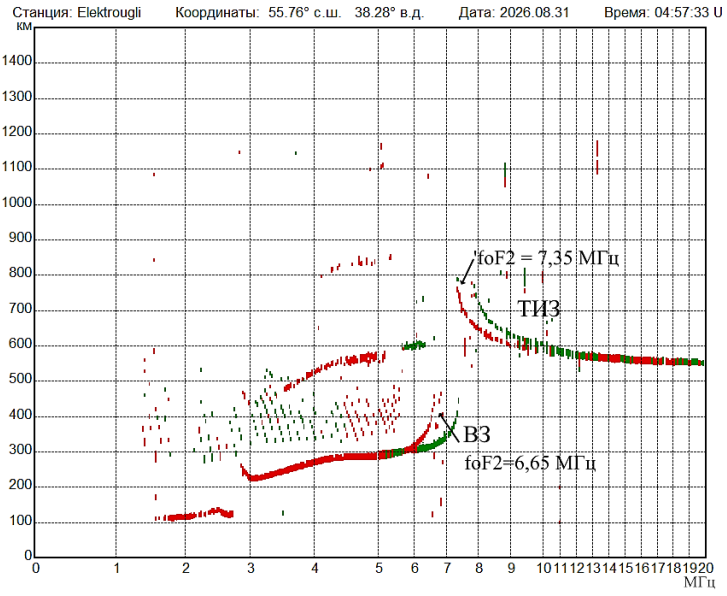


Рис. 1. *Ионограмма сеанса КА «Ионосфера» № 1 – ст. Электроугли 31.08.2026 г.*

Обработка ионограмм последовательных сеансов во время одного пролёта космического аппарата позволяет построить срез (профиль) горизонтального распределения критической частоты над наземным ионосферным пунктом. На рис. 1 представлена одна ионограмма, которая получена в результате одного сеанса радиозондирования на ионозонде «Парус-А» (ст. Электроуглы) во время пролёта космического аппарата «Ионосфера-М» № 1 31 августа 2026 г. в 04:57 по UTC. Дисперсионные кривые, соответствующие вертикальному распространению радиоволны от наземного ионозонда в ионосферу и обратно, отмечены «ВЗ». Красным цветом обозначена обыкновенная волна, зелёным цветом — необыкновенная. Обыкновенная волна имеет максимально наблюдаемую частоту (критическую частоту foF2), равную 6,65 МГц. Дисперсионные кривые, соответствующие наклонному распространению радиоволн от космического аппарата к наземному ионозонду сквозь ионосферу, отмечены «ТИЗ». Минимально наблюдаемая частота обыкновенной волны (критическая частота foF2) равна 7,35 МГц. Разницу в 0,7 МГц в измерениях критических частот можно объяснить наличием горизонтального градиента концентрации электронов в максимуме ионосферы в разных её частях. Эта разница связана с остаточными эффектами восхода Солнца и эффектами неоднородной ионизации.

На рис. 2 представлен результат расчёта горизонтального профиля критических частот максимума ионосферы во время пролёта космического аппарата «Ионосфера-М» № 3 над станцией «Электроуглы».

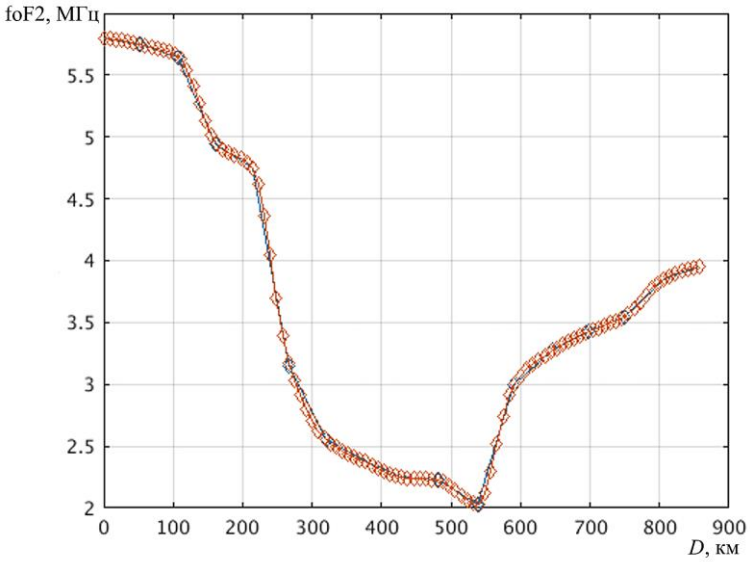


Рис. 2. *Профиль горизонтального распределения критических частот ночью по данным трансионосферных сеансов КА «Ионосфера-М» № 3 - ст. Электроуглы 28.01.2026 г.*

Из рис. 2 следует, что значение критической частоты, измеренной на траектории пересечения зондирующего сигнала и максимума ионосферы, изменяется на величину до 3,5 МГц. Это можно объяснить наличием локального минимума концентрации электронов ночью вблизи ионосферного пункта «Электроуглы», а также проявлением повышения концентрации электронов при движении космического аппарата в область высоких широт.

Таким образом, в работе представлено описание и результаты экспериментов по радиозондированию ионосферы на основе применения наземного и космического сегментов системы ионосферных наблюдений. Представлены ионограммы вертикального радиозондирования со следами наличия горизонтального градиента вблизи ионосферного пункта «Электроуглы». По результатам обработки ионограмм построены горизонтальные срезы критической частоты над наземной ионосферной станцией во время пролёта космического аппарата «Ионосфера-М».

Е. А. Рубцов
Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации
Москва, Российская Федерация

О ВНЕДРЕНИИ НАПРАВЛЕННЫХ АНТЕНН В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Аннотация. Проанализированы проблемы, связанные с применением в системах радиосвязи гражданской авиации ненаправленных антенн: высокий уровень помех, в том числе от точечных источников, переотражения, влияние на других участников воздушного движения. Предложен подход, основанный на внедрении в наземных радиоцентрах и на борту воздушных судов направленных антенных систем: антенных решеток с управляемой диаграммой направленности, стационарных или подвижных направленных антенн, а также их комбинаций.
Ключевые слова: гражданская авиация, радиосвязь, антенна, диаграмма направленности, отношение сигнал/шум.
Для цитирования: Рубцов Е. А. О внедрении направленных антенн в системах радиосвязи гражданской авиации // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

E. A. Rubtsov
The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation

ON THE IMPLEMENTATION OF DIRECTIONAL ANTENNAS IN CIVIL AVIATION RADIO COMMUNICATION SYSTEMS

Abstract. The paper analyzes problems associated with the use of omnidirectional antennas in civilian aviation radio communication systems: a high level of interference, including point sources of noise, reflections, and the impact on other participants in air traffic. The author proposes an approach, based on the implementation of directional antenna systems in radio centers and on board aircraft: controlled radiation pattern antennas, stationary or mobile directional antennas, as well as their combinations.
Keywords: civil aviation, radio communication, antenna, radiation pattern, signal-to-noise ratio.
For citation: Rubtsov E. A. On the implementation of directional antennas in civil aviation radio communication systems // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В настоящее время при осуществлении радиосвязи между диспетчером по управлению воздушным движением и экипажем воздушного судна применяются всенаправленные антенны. На воздушных судах применяются такие антенны, как АМ3-МВ, Бн-10В, АФВ-МВ2, имеющие сравнительно небольшой коэффициент усиления равный 1, -17 и -1 дБ соответственно, а также высоту 0,098, 0,067 и 0,083 от максимальной длины волны рабочего диапазона. В наземных радиоцентрах применяют антенны АНК/100-150, ОА2000V, ОА2004V, К55, имеющие коэффициент усиления не более 2 дБ и работающие с максимально подводимой мощностью до 1 кВт. Примеры диаграмм направленности для нижней и верхней бортовых антенн самолета LearJet 35 представлены на рис. 1 и рис. 2.

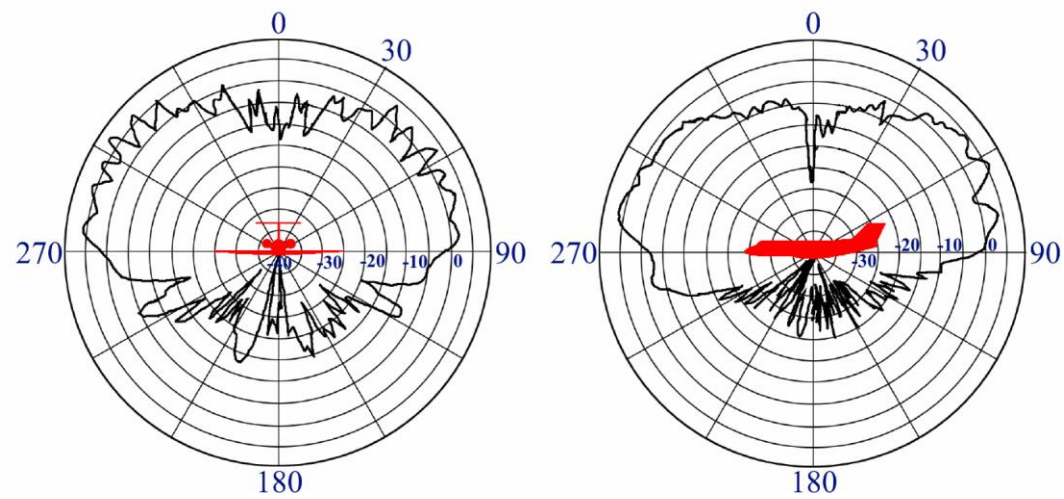


***Рис. 1**. Диаграмма направленности антенны, расположенной на верхней части фюзеляжа самолета LearJet 35 (закрылки опущены, шасси убраны)*

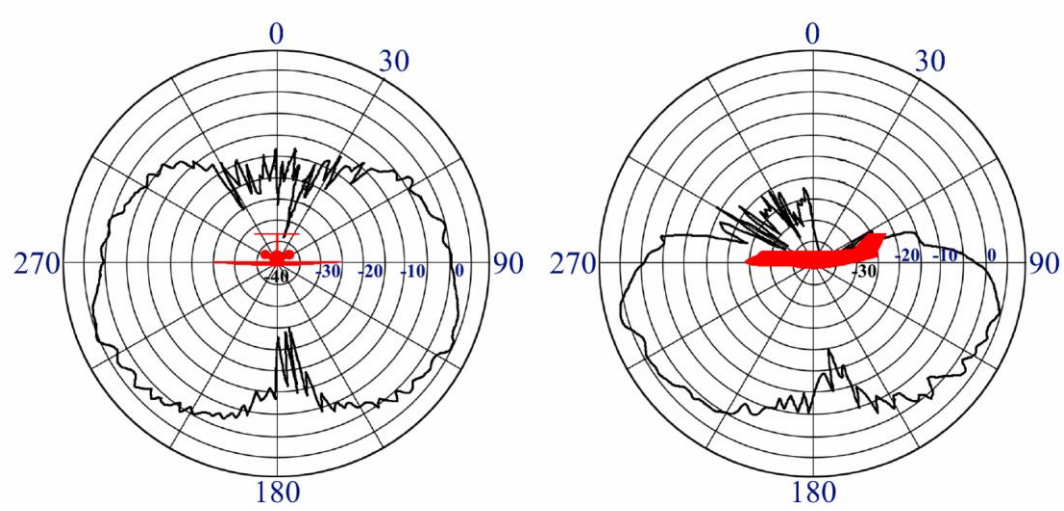


***Рис. 2**. Диаграмма направленности антенны, расположенной на нижней части фюзеляжа самолета LearJet 35 (закрылки опущены, шасси убраны)*

При эксплуатации всенаправленных антенн возникает ряд трудностей: сообщения прослушивают все участники воздушного движения независимо от того, кому они адресованы (даже при использовании системы селективного вызова SELCAL (selective calling system), сигнал может оказывать мешающее воздействие на аппаратуру воздушных судов не участвующих в радиообмене). Всенаправленные антенны подвержены влиянию естественных и искусственных шумов, особенно при наличии точечных источников помех. Переотраженные радиоволны приходят к приемной антенне с определенным временным сдвигом, вызывая быстрые замирания радиосигнала.

Описанную проблему можно решить, применяя направленные антенны в наземных радиоцентрах и на воздушных судах, причем чем более узкой будет главный лепесток диаграммы направленности, тем лучше будут получаемые характеристики: уровень принимаемых шумов, отношение сигнал/шум, влияние на других участников воздушного движения.

Реализация предложения в наземных радиоцентрах возможна путем внедрения антенной решетки с управляемой диаграммой направленности, направленных логопериодических антенн и антенн типа волновой канал (Уда-Яги), размещенных на стационарных или поворотных вышках, а также и их комбинацией. При этом необходимо найти компромисс между затратами на внедрение и обслуживание новой техники и получаемым результатом.

Реализация предложения на воздушных судах возможна путем внедрения антенной решетки с управляемой диаграммой направленности, с помощью комплекса ориентированных должным образом направленных антенн, а также и их комбинацией. В данном случае необходим компромисс между массой и габаритами антенных систем, возможностью их размещения на фюзеляже и крыльях и получаемым результатом.

Следует отметить, что для радиоцентров предпринимались попытки внедрения направленных в вертикальной плоскости антенных решеток (антенная система «Чинара-0,25»), а на самолетах государственной авиации применяется антенная решетка АРФА-МВ, состоящая из девяти несимметричных вибраторов (пять размещаются в верхней части фюзеляжа, четыре – в нижней). Эти решения частично уменьшают проблемы всенаправленных антенн. Однако наилучшие результаты в плане увеличения отношения сигнал/шум и защиты от точечных источников помех будут получены при использовании узконаправленных антенн с шириной главного лепестка в несколько градусов.

Важным фактором, позволяющим внедрить направленные антенны в системах радиосвязи гражданской авиации является применение современных систем навигации и наблюдения.

Бортовой приемник сигналов глобальной навигационной спутниковой системы позволяет экипажу определять координату воздушного судна с погрешностью в десятки, а в идеальных условиях - единицы метров. Современные инерциальные навигационные системы, включающие высокоточные гироскопы позволяют определять углы крена, тангажа и рысканья с погрешностью 0,05…0,1°. Это позволит выбрать оптимальную ориентацию диаграммы направленности антенны в пространстве с учетом пространственного положения воздушного судна.

Многопозиционные системы наблюдения предоставляют диспетчеру по управлению воздушным движением информацию о положении воздушного судна со среднеквадратической ошибкой 150 и 350 м для аэродромной и трассовой зоны соответственно. На практике, в благоприятных условиях погрешность многопозиционной системы составляет десятки метров. Также диспетчеру доступна система автоматического зависимого наблюдения вещательного типа, позволяющая получать на земле информацию от бортового навигационного комплекса (как правило от приемника сигналов глобальной навигационной спутниковой системы). Возможно организовать автоматическую передачу данных о местоположении воздушных судов в радиоцентр для задач управления диаграммой направленности антенной системы.

Таким образом, реализация описанных предложений позволит обеспечить радиообмен между двумя абонентами (воздушным судном и наземным радиоцентром), которые обладают информацией о точном местоположении участников радиообмена и способными должным образом сориентировать главный лепесток диаграммы направленности антенной системы. Это позволит повысить отношение сигнал/шум на входе приемника, обеспечить защиту от точечных источников помех, уменьшить переотражения радиоволн и влияние на других участников воздушного движения. Кроме того, возможно будет сократить используемый радиочастотный спектр путем использования одной частоты для пространственно разнесенных абонентов (воздушных судов), находящихся в ограниченном объеме воздушного пространства.

Е. А. Рубцов
Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации
Москва, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ТЕРРИТОРИИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЗОНЫ ДЕЙСТВИЯ ОБЗОРНОГО РАДИОЛОКАТОРА

Аннотация. Предложен подход, позволяющий учитывать изменения условий распространения радиоволн обзорного радиолокатора наблюдения воздушного пространства. Предлагается реализовать цифрового двойника территории для оценки текущего размера и формы зоны действия и формирования прогноза путем учета сезонных изменений углов закрытия.
Ключевые слова: безопасность полетов, наблюдение, обзорный радиолокатор, зона действия, цифровой двойник территории.
Для цитирования: Рубцов Е. А. Применение цифрового двойника территории при оценке зоны действия обзорного радиолокатора // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026..

E. A. Rubtsov
The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation

APPLICATION OF DIGITAL TWIN OF TERRITORY IN SURVEILLANCE RADAR COVERAGE ASSESSING

Abstract. The paper proposes an approach that allows taking into account changes in the propagation conditions of radio waves from a surveillance air traffic control radar. It is proposed to implement a digital twin of territory to assess the current size and shape of the coverage and to generate a forecast by taking into account seasonal changes in cut-off angles.
Keywords: flight safety, surveillance, surveillance radar, coverage, digital twin of territory.
For citation: Rubtsov E. A. Application of digital twin of territory in surveillance radar coverage assessing // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Эксплуатационные характеристики систем наблюдения напрямую влияют на безопасность полетов воздушных судов гражданской авиации. Одной из основных эксплуатационных характеристик радиолокаторов, наряду с точностью и надежностью является зона действия: область пространства, в пределах которой возможно наблюдение за воздушной обстановкой с заданными характеристиками. В настоящее время размер зоны действия определяется при вводе в эксплуатацию и подтверждается в ходе летных проверок. В документации к системам наблюдения за воздушным пространством границы зоны действия фиксируются как неизменные, однако они меняются под влиянием ряда факторов, в том числе сезонных. Таким образом для радиолокатора, представляющего собой глаза диспетчера по управлению воздушным движением, точное определение границ зоны действия является актуальной задачей.

На форму и размер зоны действия радиолокатора наибольшее влияние оказывает рельеф местности, здания и сооружения, а также растительность. При вводе в эксплуатацию определяются углы закрытия на всех углах азимута и строится соответствующий

график, по которому впоследствии рассчитывается зона действия. Как показывает практика, реальная зона действия радиолокатора отличается от расчетной, поскольку растительность в течение года меняет свои характеристики:

- лиственные леса и кустарники в летнее время и ранней осенью обладают хорошей отражающей способностью (особенно после дождя), в то время как зимой, без листвы, их можно рассматривать как полупрозрачные объекты;

- хвойные леса летом обладают средней или хорошей отражающей способностью (в зависимости от плотности деревьев), зимой, особенно после сильных снегопадов, отражающая способность возрастает.

Также стоит отметить, что сильные снегопады могут изменить очертания рельефа, что отразится на влиянии этого закрытия на зону действия.

Отсюда следует, что необходимо оценивать зону действия для разных сезонов, а также для разных погодных условий (дождь, снегопад). Поскольку изменения условий распространений радиоволн могут быть внезапными (например, сильный снегопад) или меняться в течение определенного времени (например, листопад у различных пород деревьев может длится от двух недель до двух месяцев) решение проблемы оценки зоны действия радиолокатора с заданием точных календарных сроков проведения расчетов не даст оптимального результата. Перспективным решением может стать внедрение цифрового двойника территории.

В общем случае цифровой двойник представляет собой специфическую модель реального физического объекта, группы изделий или процесса, о состоянии которых собирается информация с целью анализа и прогнозирования.

Цифровой двойник территории представляет собой комплекс информационно-технических и аналитических инструментов автоматизированного накопления, хранения и обработки информации о местности и объектах, окружающих позицию обзорного радиолокатора и влияющих на распространение радиоволн. Цифровой двойник территории должен включать постоянно обновляемые базы данных рельефа, растительности, осадков, застройки и другие. Источниками данных о существующем рельефе, зданиях и сооружениях являются цифровые модели рельефа, геодезические базы данных, кадастровые базы данных. Также возможно использование данных автоматических метеостанций и метеосайтов, спутниковых снимков и камер видеонаблюдения для оценки слоя осадков в режиме реального времени. Следует отметить, что получение актуальной информации о зданиях и сооружениях является достаточно сложной задачей, но в перспективе решить проблему может лидарная съемка, выполняемая с применением беспилотных аппаратов.

Анализ данных, содержащихся в базах цифрового двойника территории, позволит оценить текущие углы закрытия радиолокатора, а также сделать прогноз изменения углов закрытия для разных условий прохождения радиоволн. Это позволит получить точную и достоверную информацию о зоне действия радиолокатора и определить границы видимости участников воздушного движения на текущий момент и на заданную глубину прогноза.

Необходимо учесть, что поскольку современные обзорные радиолокаторы накапливают данные о дальности наблюдения воздушных судов, выполняющих рейсовые полеты на различных высотах, возможно провести анализ информации за определенный период и получить распределения дальности действия для заданных доверительных интервалов. Это позволит адаптировать математическую модель оценки дальности действия по углам закрытия к характеристикам реальной местности для конкретной позиции расположения обзорного радиолокатора.

Применением цифрового двойника территории позволит спрогнозировать возможное уменьшение зоны действия обзорного радиолокатора и, как следствие, невозможность наблюдения некоторых областей воздушного пространства, тем самым удастся повысить информационную осведомленность диспетчера по управлению воздушным движением и уровень безопасности полетов в целом.

Р. А. Рычков[1,2], С. В. Кривальцевич[1,2,3]
[1]Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация
[3]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА НАПРАВЛЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Аннотация. Представлено исследование направленных характеристик антенн декаметрового диапазона в зависимости от радиофизических параметров подстилающей поверхности. Антенны представляют собой варианты горизонтального и вертикального вибраторов. Проведённый вычислительный эксперимент показал разный характер зависимости направленных свойств двух типов антенн.
Ключевые слова: подстилающая поверхность, радиофизические параметры, направленные характеристики антенн.
Для цитирования: Рычков Р. А., Кривальцевич С. В. Изучение влияния радиофизических параметров подстилающей поверхности на направленные характеристики антенн декаметрового диапазона // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

R. A. Rychkov[1,2], S. V. Krivaltsevich[1,2,3]
[1]Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation
[3]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF RADIOPHYSICAL PARAMETERS OF THE UNDERLYING SURFACE ON THE DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF HF-BAND ANTENNAS

Abstract. This research presents a study of the directional characteristics of HF-band antennas influenced by radiophysical parameters of the underlying surface. The antennas are variants of horizontal and vertical radiators. The computational experiment demonstrates different dependence behavior for the directional properties of the two types of antennas.
Keywords: underlaying terrain, radiophysical parameters, directional characteristics of the antennas.
For citation: Rychkov R. A., Krivaltsevich S. V. Research of the influence of radiophysical parameters of the underlying surface on the directional characteristics of HF-band antennas // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Для обеспечения радиосвязи на территории России требуются методы, способные передать информацию на большие расстояния. Для этих целей используется дальняя связь, реализуемая различными методами, одним из которых является КВ-радиосвязь,

построенная на принципе ионосферного распространения. Известно, что для организации КВ-радиосвязи ионосферными волнами используются радиоволны декаметрового диапазона. Используемые в КВ-диапазоне антенны имеют размеры от десятка до нескольких сотен метров и располагаются в непосредственной близости от подстилающей поверхности, поэтому её влияние на излучение антенн необходимо учитывать. Таким образом, целью данного исследования является изучение зависимости направленных характеристик антенн декаметрового диапазона от радиофизических параметров подстилающей поверхности.

Для исследования были взяты две антенны, используемые в декаметровом диапазоне: диполь Наденко длиной 16,2 метра, представляющий собой горизонтальный вибратор и антенна вида «широкополосный вертикальный излучатель» высотой 15 метров. Для изучения зависимости направленных характеристик от радиофизических параметров подстилающей поверхности использовался программный пакет MMANA-GAL BASIC, позволяющий учитывать влияние подстилающей поверхности на диаграмму направленности моделируемой антенны. Значения диэлектрической проницаемости двух почв были получены с помощью метода емкостной диэлектрической спектроскопии. Почвы по гранулометрическому составу, в соответствии с классификацией по Н. А. Качинскому, определены как суглинок и песчаная почва. В результате моделирования были получены диаграммы направленности антенн на частотах 3, 6, 9, 18, 21, 27 МГц. Моделирование производилось для пяти значений влажности почв: 8,9%, 15,11%, 20,96%, 24,94%, 30,44% для суглинистой почвы; 6,8%, 15,21%, 20,46%, 26,73%, 31,86% для песчаной почвы. По полученным диаграммам направленности были рассчитаны коэффициенты усиления антенн для трёх углов места: 5, 17 и 30 градусов (при значении азимута 0 градусов).

На рис. 1 изображён график для антенны типа диполь Наденко для угла места 5 градусов. На горизонтальной оси расположены значения частот, на вертикальной представлена величина коэффициента усиления. Для каждой частоты на графике расположены десять точек, соответствующие десяти значениям влажности для двух почв. В начале диапазона наблюдается максимальный разброс коэффициента усиления: 4,4 дБи на 3 МГц.

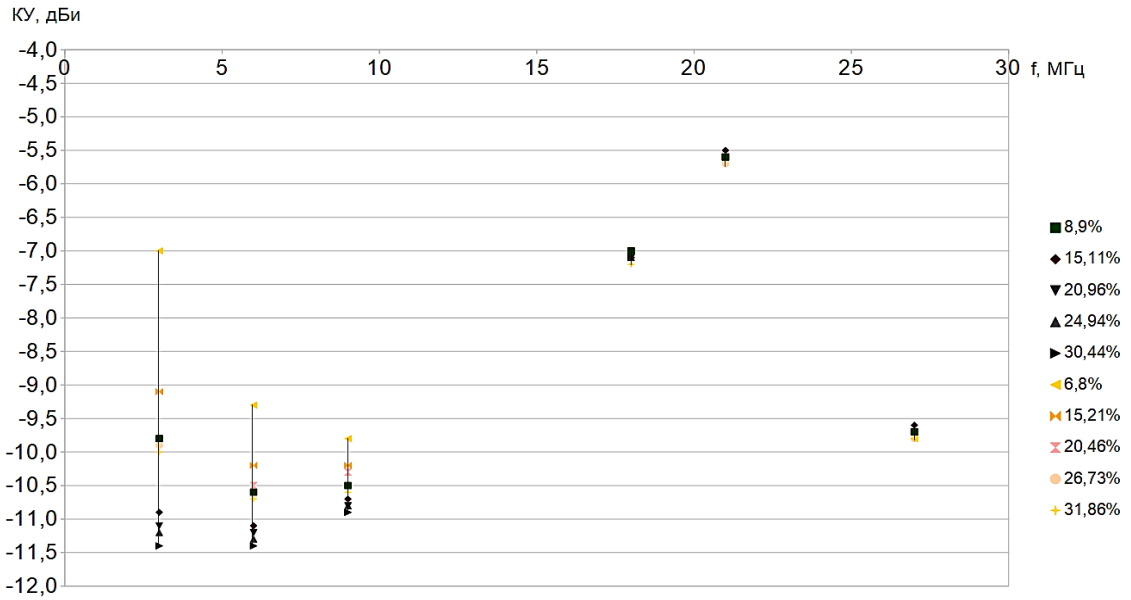


Рис. 1. *График разброса значений коэффициента усиления антенны типа диполь Наденко на десяти величинах влажности для шести радиочастот. Угол места 5 градусов. Тёмные указатели легенды для суглинистой почвы, светлые указатели – для песчаной почвы*

С увеличением частоты разброс уменьшается и, начиная со значения 18 МГц, почти не меняется, составляя всего 0,2 дБи. На углах места 17 и 5 градусов минимальный разброс приходился на частоту 9 МГц, в остальном изменение коэффициента усиления оставалось таким же. Разброс на частотах 18, 21 и 27 МГц составил 0,7, 0,8 и 0,9 дБи для угла места 17 градусов и 1,4, 1,5 и 1,6 дБи для угла места 30 градусов соответственно.

На рис. 2 изображён график для антенны вида «широкополосный вертикальный излучатель» для угла места 5 градусов. В начале диапазона максимальный разброс коэффициента усиления: 10,9 дБи при 3 МГц. На 6 МГц наблюдается чуть меньший разброс - 9 дБи. На частотах 9 и 21 МГц разброс составил 5,4 и 4,5 дБи соответственно. Минимальный разброс на частоте 27 МГц – 0,9 дБи. Для угла места 17 градусов наибольший разброс наблюдался на частоте 21 МГц и составил 10,2 дБи. Минимальный разброс так же, как и при 5 градусах, пришёлся на частоту 27 МГц и составил 1,3 дБи. Для угла места 30 градусов максимальный разброс коэффициента усиления на частоте 9 МГц – 9,3 дБи. На частоте 21 МГц значение разброса остаётся значительным: 6,6 дБи. Минимальный разброс, аналогично двум другим углам излучения, наблюдается на частоте 27 МГц, составляет 0,6 дБи.

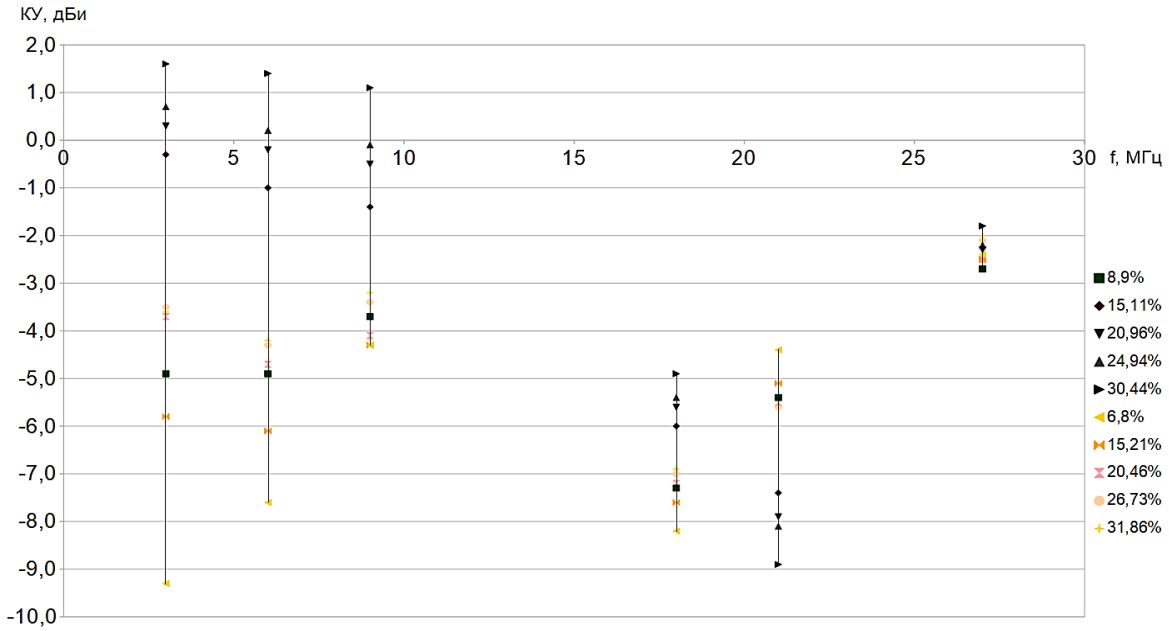


Рис. 2. *График разброса значений коэффициента усиления антенны вида «широкополосный вертикальный излучатель» на десяти величинах влажности для шести радиочастот. Угол места 5 градусов. Тёмные указатели легенды для суглинистой почвы, светлые указатели – для песчаной почвы*

Как видно из графиков, на излучение вертикального вибратора подстилающая поверхность оказала большее влияние, чем на излучение горизонтального. Это объясняется тем, что рассматриваемая антенна типа Диполь Наденко является симметричной, а для излучения симметричных антенн, как известно, подстилающая поверхность служит отражающей и в меньшей степени влияет на диаграмму направленности. Для несимметричных антенн подстилающая поверхность играет роль «второго плеча», при расчётах это учитывается как зеркально-отражённая аналогичная антенна, находящаяся под землёй. Поэтому для несимметричных антенн изменение радиофизических параметров подстилающей поверхности вызывает большее влияние на направленные характеристики моделируемых антенн.

Таким образом, была определена зависимость направленных характеристик антенн декаметрового диапазона от радиофизических параметров подстилающей поверх-

ности. На направленные характеристики горизонтального вибратора изменение радиофизических параметров подстилающей поверхности оказало меньшее влияние, чем на направленные характеристики вертикального вибратора. При увеличении угла места разница в разбросе уменьшается. Для горизонтального излучателя изменение разброса при увеличении угла места остаётся равномерным по диапазону частот. Для вертикального излучателя с ростом частоты разброс значений коэффициента усиления уменьшается. Учитывая конструкцию моделируемых антенн, полученные данные соответствуют теоретическим представлениям.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Ю. П. Саломатов, В. С. Панько, А. В. Минаков
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

РАСЧЕТ ВЫСОТНЫХ МНОЖИТЕЛЕЙ В ЗАДАЧЕ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ВОКРУГ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Аннотация. Получено выражение для высотных множителей ряда нормальных волн в задаче дифракции электромагнитных волн вокруг Земли. Приведены результаты расчетов высотных множителей для различных типов подстилающих поверхностей и различных номеров ряда нормальных волн.
Ключевые слова*:* электромагнитные волны, дифракция, сферическая поверхность Земли, функция ослабления, высотный множитель, численные методы, функция Эйри.
Для цитирования*:* Саломатов Ю. П., Панько В. С. Минаков А. В. Расчет высотных множителей в задаче дифракции электромагнитной волны вокруг земной поверхности // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

Yu. P. Salomatov, V. S. Panko, A. V. Minakov
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

CALCULATION OF HEIGHT GAIN FACTORS IN THE PROBLEM OF ELECTROMAGNETIC WAVE DIFFRACTION AROUND THE EARTH'S SURFACE

Abstract. The paper considers the height gain factors for a series of normal modes in the problem of electromagnetic wave diffraction around the Earth. The calculation results of the height gain factors are presented for various types of underlying surfaces and different mode numbers.
Keywords*:* electromagnetic waves, diffraction, spherical Earth surface, attenuation function, height gain factor, numerical methods, Airy function.
For citation*:* Salomatov Yu. P., Panko V. S., Minakov A. V. Calculation of height gain factors in the problem of electromagnetic wave diffraction around the Earth's surface // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

При определении поля вертикального излучателя, расположенного на поверхности Земли, используется так называемая функция ослабления. Для сферической Земли эта функция представляет собой ряд нормальных волн с номерами $n = -1\ldots\infty$, комплексная амплитуда которых зависит от характеристик подстилающей поверхности, частоты и углового расстояния между излучателем и точкой наблюдения. Обычно функция ослабления рассматривается для случая, когда излучатель расположен на поверхности Земли, а точка наблюдения может перемещаться по высоте. Если излучатель расположен также на некоторой высоте, то влияние его подъема на функцию ослабления можно определить соответствующим высотным множителем $f_n(y)$. Задачей настоящей работы является определение значения высотного множителя в зависимости от высоты над поверхностью Земли y и номера нормальной волны n.

Используя дифференциальное уравнение Эйри, а также уравнение полюсов, можно получить дифференциальное уравнение для высотного множителя n-й нормальной волны. Решить это уравнение можно численным образом. Также многократное дифференцирование дает рекуррентную формулу для нахождения производных высотного

множителя и позволяет записать его разложение в ряд по степеням y.

С использованием полученных соотношений проведен расчет значений $f_n(y)$ для трех типов электрофизических параметров поверхности на частоте 2 МГц: 1) морская поверхность, σ = 5 См/м, ε = 80; 2) «средняя» Земля, σ = 0.005 См/м, ε = 13; 3) сухой песок, σ = 0.0002 См/м, ε = 2. Результаты расчетов фазы и модуля высотных множителей нормальных волн функции ослабления с номерами n = 1, 3 и 6 представлены на рис. 1 и 2. Кривые на рисунках обозначены двумя цифрами, первая из которых соответствует типу подстилающей поверхности, а вторая – номеру n нормальной волны.

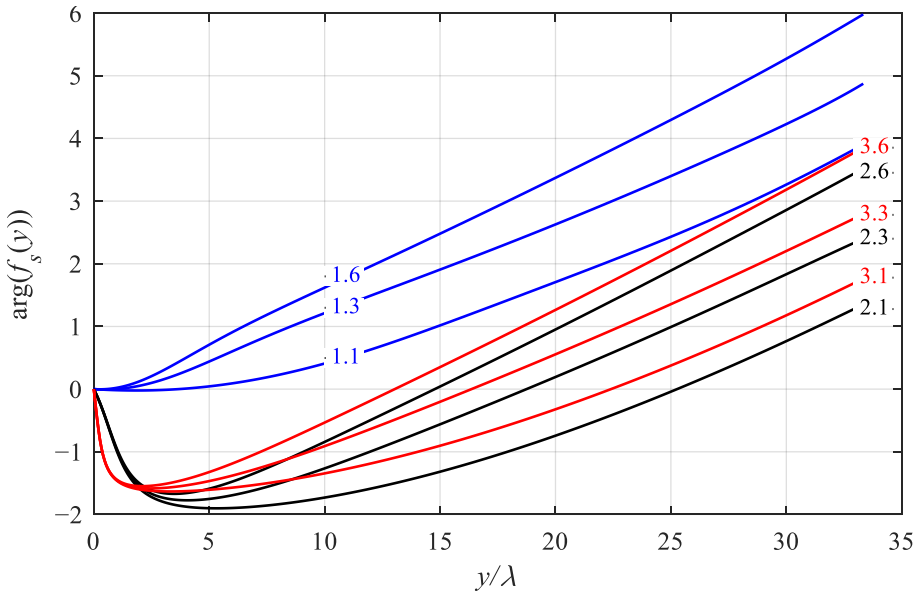


Рис. 1. *Фаза (радиан) высотного множителя в зависимости от высоты для различных типов подстилающей поверхности и номера нормальной волны*

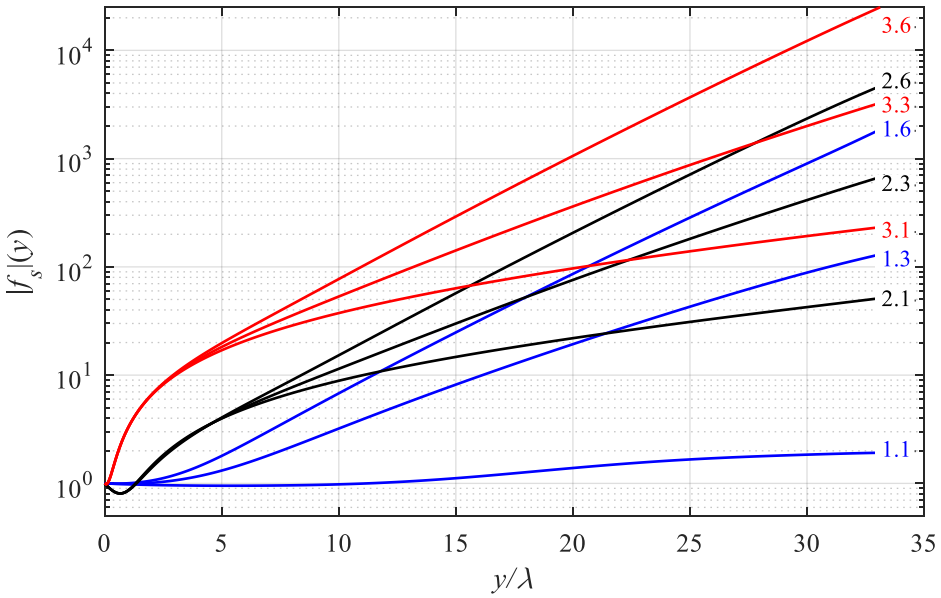


Рис. 2. *Модуль высотного множителя в зависимости от высоты для различных типов подстилающей поверхности и номера нормальной волны*

Из рис. 1 и 2 видно, что поведение высотного множителя на небольшой высоте (y < 3…5λ) полностью определяется характером подстилающей поверхности и не зависит от номера нормальной волны. На больших высотах (y > 10λ) поведение высотного множителя (увеличение модуля и приращения фазы) определяется как номером нормальной волны, так и параметрами подстилающей поверхности.

Полученная методика определения высотных множителей в виде степенного ряда позволит выполнить расчеты напряженности электромагнитного поля в задаче дифракции электромагнитных волн вокруг Земли с целью выяснения области, существенной для распространения радиоволн.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (номер FSRZ-2026-0010).

В. М. Селезнев, М. С. Манахова, И. С. Сорокин, А. А. Трушанин
ООО «Научно-производственное предприятие «ПРИМА»
Нижний Новгород, Российская Федерация

ФАЗОВАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛЕЙ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛУЧОМ КОНФОРМНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Аннотация. Предложен подход к управлению лучом антенной решетки с использованием фазовой интерполяции результатов прямых измерений полей антенных элементов. Отмечены преимущества предложенного подхода перед методом на основе геометрической оптики. Эффективность использования фазовой интерполяции для управления лучом показана на примере конформной антенной решетки из объемных спиральных излучателей.
Ключевые слова*:* фазовая интерполяция, конформная антенная решетка, сканирование.
Для цитирования*:* Селезнев В. М., Манахова М. С., Сорокин И. С., Трушанин А.А. Фазовая интерполяция результатов измерений полей антенных элементов для электронного управления лучом конформной антенной решетки в широком диапазоне частот // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

V. M. Seleznev, M. S. Manahova, I. S. Sorokin, A. A. Trushanin
PRIMA Research & Production Enterprise, Nizhny Novgorod, Russian Federation

PHASE INTERPOLATION OF ANTENNA ELEMENTS MEASURING RESULTS FOR ELECTRONIC CONTROL OF THE BROADBAND CONFORMAL ANTENNA ARRAY BEAM

Abstract*.* The paper proposes an approach to controlling the antenna array beam using phase interpolation of the results of the antenna element field direct measurements. The proposed approach demonstrates advantages over the method based on the geometric optics. The efficiency of the phase interpolation for controlling the beam is shown by the example of the conformal antenna array consisting of the volumetric spiral radiators.
Keywords*:* phase interpolation, conformal antenna array, scanning.
For citation*:* Seleznev V. M., Manahova M. S., Sorokin I. S., Trushanin A. A. Phase interpolation of antenna elements measuring results for electronic control of the broadband conformal antenna array beam // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Фазированные антенные решетки находят широкое применение в современных системах беспроводной связи и радиолокации. Их главное преимущество – возможность быстро изменять форму и направление главного луча диаграммы направленности, что обеспечивает высокую скорость определения координат источников сигнала и поддержку устойчивого соединения между абонентами в динамически меняющихся условиях приёма-передачи данных и помеховой обстановки. При этом остается актуальным вопрос оптимального управления лучом в широком диапазоне частот.

На практике чаще всего используются простые с точки зрения производства линейные и плоские антенные решетки с ограниченным сектором сканирования. Более

широкий сектор сканирования имеют конформные антенные решетки. Например, разработанная авторами решетка из расположенных вдоль части цилиндрической поверхности объемных спиральных излучателей СВЧ-диапазона способна отклонять луч на ±50° в азимутальной плоскости.

Для формирования луча в заданном направлении нужно реализовать на апертуре решетки определенное фазовое распределение. Обычно фазовые распределения рассчитываются с помощью метода на основе геометрической оптики. Данный метод прост в реализации и дает аналитическое решение. При этом он менее точен поскольку не учитывает межэлементное взаимодействие и краевые эффекты.

Авторами предложен оригинальный метод расчета фазовых распределений на основе обработки результатов прямых измерений комплексных полей $\hat{E}_{\varphi i}$, $\hat{E}_{\theta i}$ элементов антенной решетки на различных частотах в дискретных точках φ_i и θ_i по азимуту и углу места соответственно. Аргументы измеренных комплексных полей $\arg\{\hat{E}_{\varphi i}\}$, $\arg\{\hat{E}_{\theta i}\}$ эквивалентны относительным фазовым сдвигам ψ_i, компенсируя которые можно формировать лучи в направлениях φ_i и θ_i. В качестве примеров на рис. 1 приведены цветовые карты фазовых распределений, рассчитанных в приближении геометрической оптики и методом на основе измерений полей элементов для центрального луча и отклоненного по азимуту на 50°. Вдоль осей отмечены номера элементов (вид с фронта), цветом показаны относительные фазовые сдвиги ψ_i.

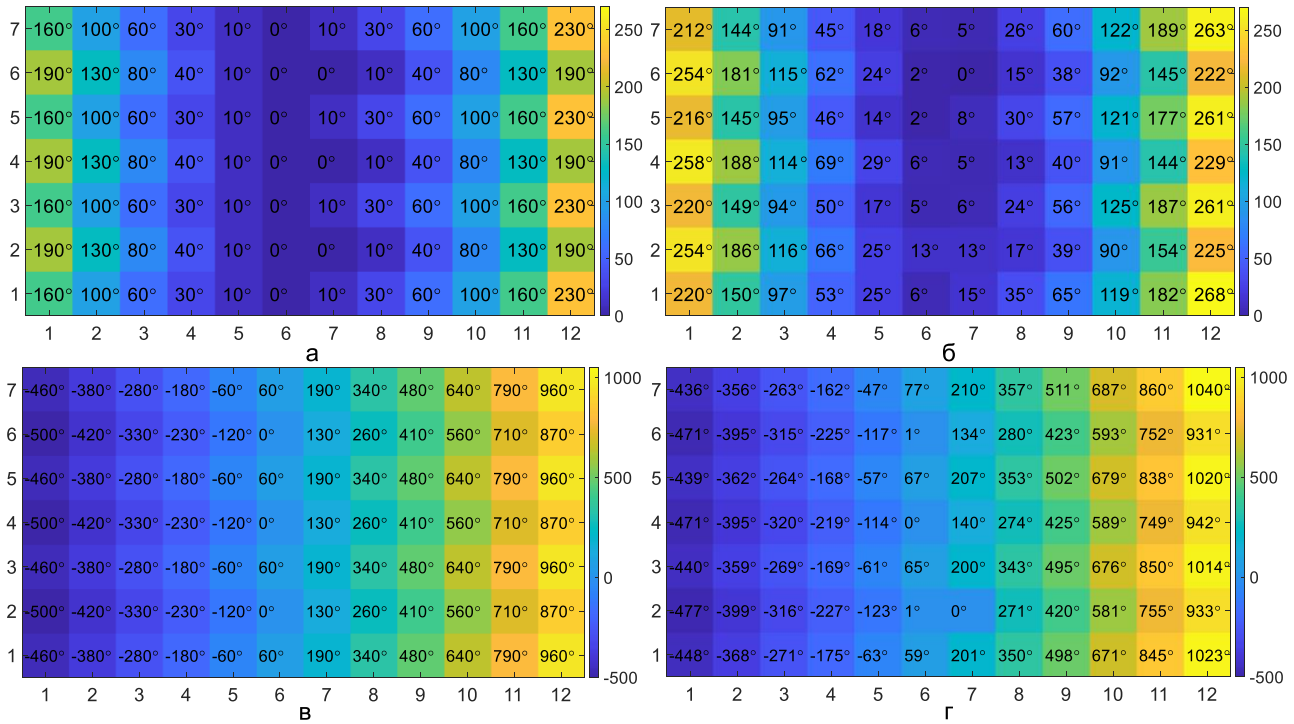


Рис. 1. *Цветовые карты фазовых распределений, рассчитанных в приближении геометрической оптики и методом на основе измерений для центрального (а, б) и отклоненного лучей (в, г)*

Видно, что разница между фазовыми распределениями увеличивается на краях антенной решетки. Согласно расчетам, метод на основе результатов измерений позволяет увеличить коэффициент усиления антенной решетки в среднем на 1–1,5 дБ, уменьшить уровень боковых лепестков на 1–3 дБ и повысить точность позиционирования главного луча на 2–4° в зависимости от частоты и направления.

Следует отметить, использование в явном виде метода на основе измерений требует хранения в аппаратной части системы связи для каждой частоты отдельной таблицы с заранее рассчитанными фазовыми распределениями для всех возможных углов

отклонения луча. При этом хранение и обработка большого числа калибровочных таблиц увеличивает вычислительные затраты и ограничивает гибкость в перестройке частотных каналов, в которых может работать антенная решетка. Кроме того, процесс измерения полей многоэлементных решеток достаточно сложен и занимает много времени, поэтому не может быть использован при их серийном производстве.

Для решения описанных проблем было решено сначала получить медианные значения измеренных полей антенных решеток по трем изготовленным опытным образцам, а затем провести фазовую линейную интерполяцию в рабочей полосе частот. На рис. 2 приведены примеры фазовой интерполяции в двух направлениях сферической системы координат $\varphi_1 = 0°$, $\theta_1 = 90°$ (нормаль к антенне) и $\varphi_2 = -50°$, $\theta_2 = 50°$ (левый верхний угол) для двух элементов, один из которых расположен в центральной части решетки, а другой – вблизи края. Дополнительно на графиках изображены кривые измеренных фаз элементов антенных решеток и медианные фазы.

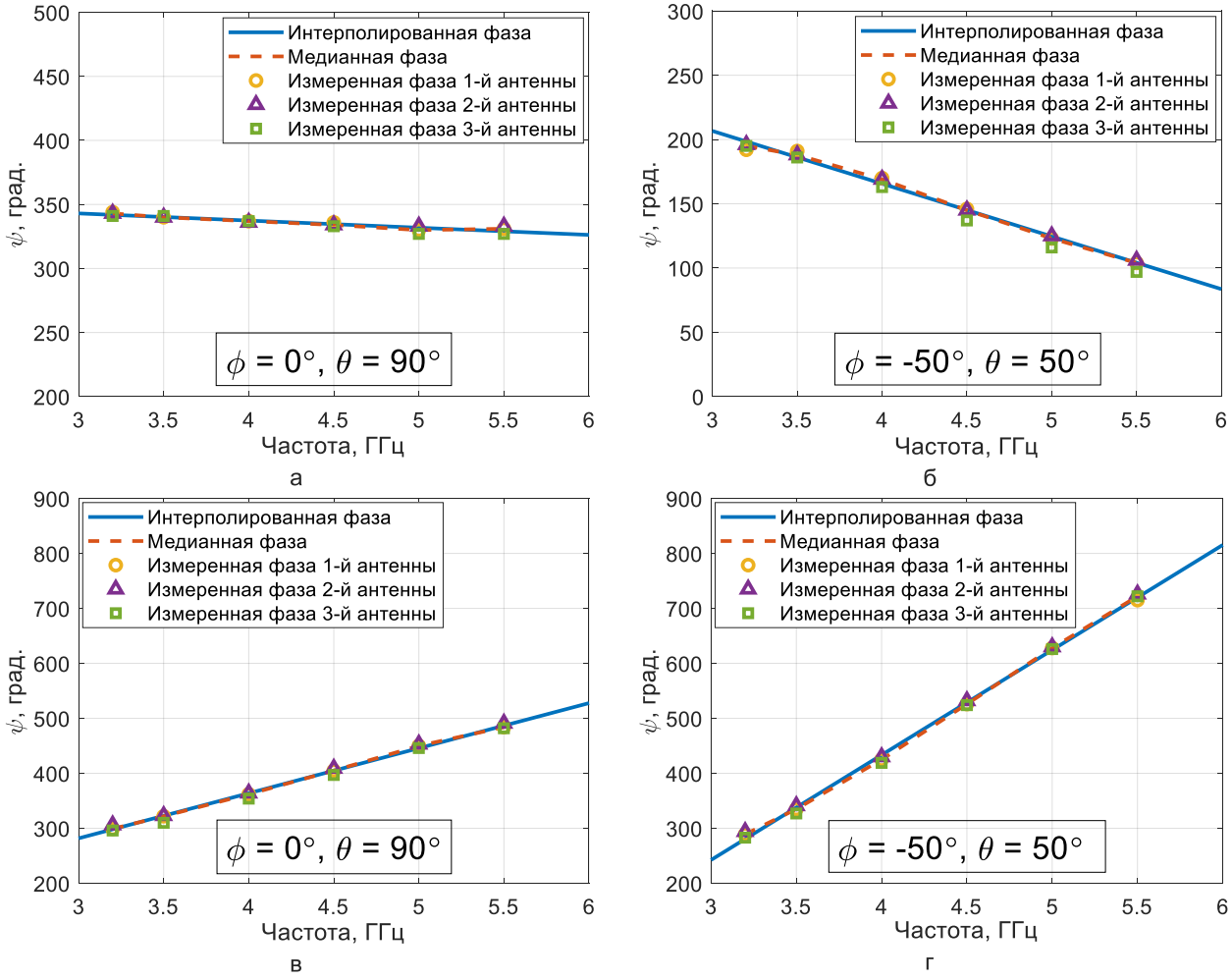


Рис. 2. *Фазовая интерполяция для элементов вблизи центра (а, б) и края решетки (в, г)*

Видно, что все фазо-частотные характеристики могут быть с хорошей точностью аппроксимированы линейной функцией. Отклонение измеренных фаз от медианных значений не превышает 10°. Таким образом, в памяти устройства достаточно хранить две калибровочные таблицы, содержащие массивы коэффициентов линейных функций k и b для всех направлений и элементов. Зная k и b, за несколько простых операций можно восстановить фазовые распределения для любой рабочей частоты антенных решеток. Поскольку эти коэффициенты получены на основе усредненных полей, то при серийном производстве для всех антенных решеток можно использовать одну пару калибровочных таблиц с коэффициентами k и b соответственно.

Согласно сделанным оценкам, разница между характеристиками антенных решеток, полученными на основе результатов измерений и интерполированных данных, не превышает 3–5%. При этом вычислительные затраты на обработку двух таблиц практически такие же, как при расчете в приближении геометрической оптики. Представленные результаты свидетельствуют о том, что подход на основе фазовой интерполяции может быть эффективно использован для электронного управления лучом многоэлементных антенных решеток с широкой рабочей полосой частот.

Л. В. Шагарова, А. С. Ященко
Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ FENGYUN-3 ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ РАДИОСВЯЗИ

Аннотация. Полное электронное содержание ионосферы является одним из основных интегральных параметров, характеризующих состояние ионосферной плазмы и её пространственно-временную изменчивость. В настоящей работе оценивается возможность использования данных со спутников Fengyun-3 для исследования структуры и динамики ионосферы Земли. Рассмотрены особенности двухчастотных радиозатменных GNSS-наблюдений и метод оптического мониторинга ионосферного ультрафиолетового свечения с борта космического аппарата.
***Ключевые слова**:* ионосфера, электронная концентрация, радиосвязь.
***Для цитирования**:* Шагарова Л. В., Ященко А. С. Об определении полного электронного содержания ионосферы по данным спутников Fengyun-3 для решения практических задач радиосвязи // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

L. V. Shagarova, A. S. Yashchenko
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

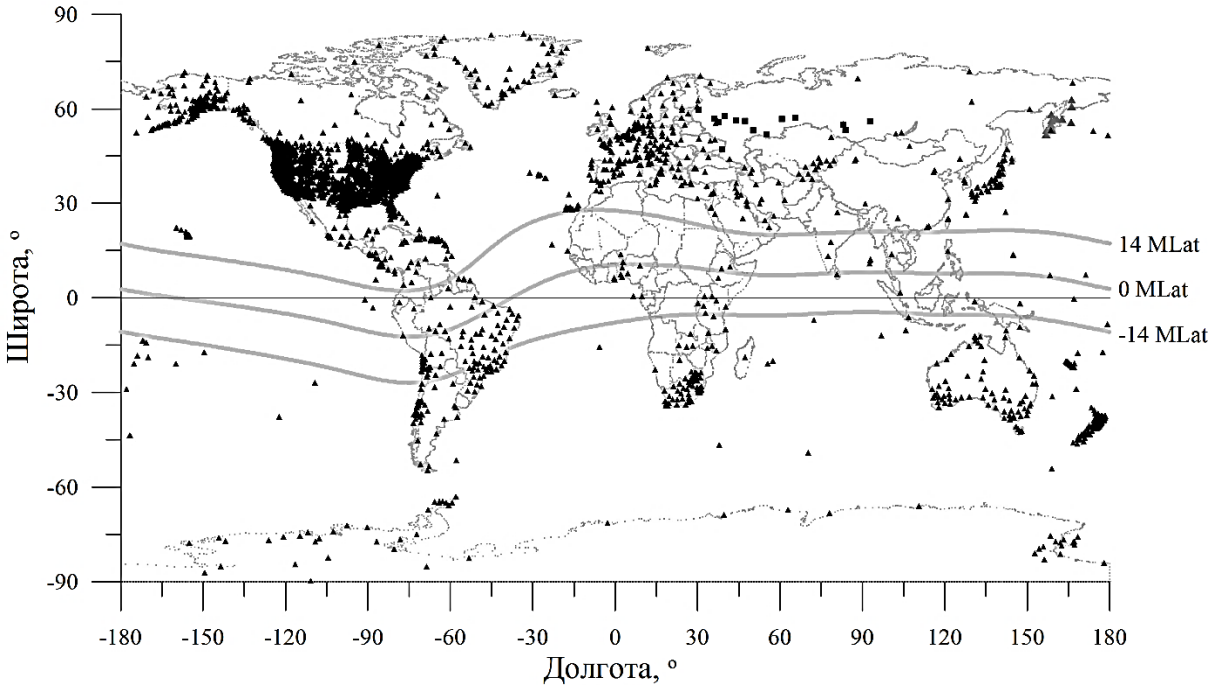
ESTIMATION OF IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENT FROM FENGYUN-3 SATELLITE FOR RADIO COMMUNICATION APPLICATIONS

Abstract. The total electron content of the ionosphere is a key integral parameter characterizing the state of ionospheric plasma and its spatiotemporal variability. This paper assesses the feasibility of using data from Fengyun-3 satellites to investigate the structure and dynamics of the Earth's ionosphere. The research considers the features of dual-frequency GNSS radio occultation observations and the optical monitoring method of ionospheric ultraviolet glow from a spacecraft.
***Keywords**:* ionosphere, electron content, radio communication.
***For citation**:* Shagarova L. V., Yashchenko A. S. Estimation of ionospheric total electron content from Fengyun-3 satellite for radio communication applications // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Ионосфера Земли представляет собой динамическую плазменную оболочку, состояние которой определяется воздействием солнечного электромагнитного излучения, потоков заряженных частиц, геомагнитного поля и процессов в верхней атмосфере. Пространственно-временные изменения электронной концентрации ионосферы оказывают существенное влияние на распространение радиоволн, спутниковую навигацию, радиосвязь и работу космических систем, что определяет необходимость мониторинга ключевых параметров ионосферы.

В настоящее время одним из наиболее широко применяемых подходов к мониторингу полного электронного содержания ионосферы (TEC) является использование

данных глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS), полученных наземными приёмниками на двух частотах. Однако наземные GNSS-сети характеризуются ограничением пространственного покрытия, обусловленного неравномерным распределением станций на поверхности Земли. Схема глобального наземного размещения GNSS-станций, предоставляющих информацию в открытый доступ (см. рис.), представлена на сайте Института солнечно-земной физики. Линиями на карте также показаны положения экватора и магнитных широт 0 и ±14°.



Размещение наземных станций GNSS

Альтернативной формой мониторинга пространственно-временной изменчивости ионосферы является зондирование непосредственно с борта космического аппарата. Известны два класса спутниковых инструментов: GNSS-приёмники, реализующие метод радиозатменного зондирования, и ионосферные фотометры, регистрирующие собственное излучение верхней атмосферы в дальней ультрафиолетовой области. На данный момент насчитывается несколько десятков космических аппаратов, имеющих на борту аналогичные инструменты. Однако доступ российских пользователей к архиву тематических карт полного электронного содержания и электронного профиля возможен лишь посредством информационных ресурсов Китайского метеорологического управления. При дистанционном мониторинге состояния ионосферы используются данные, полученные с борта космических аппаратов серии Fengyun-3.

Целевая нагрузка спутников серии Fengyun-3 включает инструмент Global Navigation Satellite System Occultation Sounder (GNOS), позволяющий создавать профили электронной концентрации на основе информации по дисперсионной задержке радиосигнала. Аппаратура первого поколения (GNOS-I) установлена на следующих спутниках: FY-3C, FY-3D; второго (GNOS-II) на FY-3E, FY-3F, FY-3G, FY-3H.

Данные глобальных навигационных спутниковых систем, принимаемые приборами GNOS-I, установленными на спутниках FY-3C и FY-3D, регистрируют фазовые и псевдодальностные измерения сигналов GPS (NAVSTAR) и BDS (BeiDou), претерпевших рефракцию в атмосфере и ионосфере Земли, что позволяет восстанавливать полное электронное содержание и профили электронной концентрации ионосферы без привлечения внешних ионосферных моделей. С помощью прибора GNOS-I реализуется метод

радиозатменного зондирования, при котором сигнал навигационного спутника принимается на борту низкоорбитального аппарата при заходе или восходе за лимб Земли. Измерения проводятся в двух частотных диапазонах: GPS L1 (1575,42 МГц) и L2 (1227,60 МГц), а также BDS B1 и B2, с частотой дискретизации 1 Гц для ионосферных данных. Количество каналов GPS и BDS обеспечивает регистрацию около 1000 событий зондирования в сутки.

Прибор GNOS-II, установленный на спутниках FY-3E, FY-3F, FY-3G и FY-3H, представляет собой развитие GNOS-I и реализует интегрированное радиозатменное и рефлектометрическое зондирование в одном инструменте. Приёмник GNOS-II расширен до четырёх навигационных систем (GPS, Galileo, GLONASS, BDS).

К целевой спутниковой нагрузке, позволяющей определять полное электронное содержание оптическим методом, относятся фотометры Ionospheric PhotoMeter (IPM) и Triple-angle Ionospheric PhotoMeter (Tri-IPM), размещенные на следующих спутниках Fengyun-3: IPM-I (FY-3D), Tri-IPM (FY-3E), PM-II (FY-3H). Следует отметить, что спутник FY-3H в настоящее время функционирует в режиме тестирования. Информационные продукты, полученные по данным фотометров IPM/Tri-IPM, представляют собой самостоятельный источник информации о глобальном состоянии ионосферы. Их преимущество заключается в возможности получения пространственно распределённых данных TEC и параметров F2-слоя по оптическим наблюдениям ионосферного свечения.

Фотометр Tri-IPM измеряет интенсивность свечения в двух спектральных диапазонах: на длине волны атомарного кислорода OI 135.6 нм и в полосе Лаймана–Бирджа–Хопфилда (N_2 LBH, 147.5–162.5 нм) молекулярного азота. Три объектива прибора ориентированы под углами 0° и ±30° относительно надира.

Фотометры IPM-I, IPM-II работают в тех же спектральных диапазонах – OI 135,6 нм и N_2 LBH, но имеют два канала и ведут наблюдения в надирном направлении. Данные ионосферных фотометров IPM регистрируют собственное излучение верхней атмосферы в дальней ультрафиолетовой области, что позволяет восстанавливать полное электронное содержание ионосферы без привлечения GNSS-фазовых измерений.

Резюмируя, можно отметить, что на данный момент на орбите функционирует серия космических аппаратов, позволяющих осуществлять пространственно-временной мониторинг состояния ионосферы. Перспективным направлением является комплексирование данных GNOS и фотометров, а также их оперативная ассимиляция в модели ионосферы для решения практических задач радиосвязи.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4.

А. О. Щирый
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Российская Федерация

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ: ПОДСИСТЕМА ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРНЫХ РАДИОЛИНИЙ

Аннотация. Предложена многоагентная интеллектуальная система с эмпирическим, модельным и когнитивным контурами, включающая обращение к большим языковым моделям, в которой измерительный комплекс рассматривается не как автономный источник данных, а как часть замкнутого цикла научного исследования. Отдельное внимание уделено подсистеме характеристик ионосферы и ионосферных радиолиний.
Ключевые слова*:* ионосфера, радиозондирование ионосферы, ионограмма, автоматизация научных исследований, многоагентные системы.
Для цитирования*:* Щирый А. О. Интеллектуальная система радиофизических измерений: подсистема характеристик ионосферы и ионосферных радиолиний // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. O. Schiriy
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Russian Federation

INTELLIGENT RADIOPHYSICAL MEASUREMENT SYSTEM: SUBSYSTEM OF CHARACTERISTICS OF THE IONOSPHERE AND IONOSPHERIC RADIO LINES

Abstract. The paper proposes an intelligent multi-agent system, featuring empirical, model-based, and cognitive loops—including the use of large language models—wherein the measurement complex is viewed not as an autonomous data source, but as part of a closed-loop scientific research cycle. Particular attention is paid to the subsystem for characterizing the ionosphere and ionospheric radio lines.
Keywords*:* ionosphere, ionospheric radio sounding, ionogram, automation of scientific research, multi-agent systems.
For citation*:* Schiriy A. O. Intelligent radiophysical measurement system: subsystem of characteristics of the ionosphere and ionospheric radio lines // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Исследования ионосферы необходимы как для целей фундаментальной науки, так и для прикладных целей. Работа посвящена автоматизации радиозондирования ионосферы и последующей обработки полученных данных.

Вообще, системы автоматизации научных измерений традиционно создавались в монолитной архитектуре (или её вариант – конгломерат монолитов, «пакет программ»), пусть даже архитектура внутренней реализации монолита обладала многоуровневостью и другими признаками развитой декомпозиции. Современные технологические возможности заставляют задуматься о преимуществах многоагентной архитектуры, а также включать инструменты работы с большими языковыми моделями в состав системы и (говоря шире) весь исследовательский цикл.

В работе предлагается интеллектуальная система радиофизических измерений, в

которой измерительный комплекс рассматривается не как автономный источник данных, а как часть замкнутого цикла научного исследования: измерение → обработка и накопление данных → получение знаний и гипотез → физическое моделирование → планирование следующего эксперимента → новое измерение. Архитектура системы реализует идею объединения в едином контуре трёх уровней:

– эмпирического — получение и обработка реальных измерений;

– модельного — построение и проверка физических моделей;

– когнитивного — формирование гипотез, планирование исследований и управление взаимодействием компонентов системы.

Покажем для примера некоторые сценарии работы интеллектуальной системы.

Первым таким сценарием может быть адаптивное реагирование на гелиогеофизическое событие. В данном сценарии система переходит из состояния фонового мониторинга в режим интенсивного сбора данных при обнаружении внешнего триггера. Основная цель – не пропустить быстротекущие фазы ионосферного отклика. Агент мониторинга текущей гелио и геофизической обстановки по внешним данным фиксирует событие (всплеск какой-либо гелиогеофизической характеристики), агент выдвижения гипотез формирует предиктивную модель, агент формирования (корректировки) режимов (расписаний) измерений меняет сценарий измерений таким образом чтоб наилучшим образом подстроиться под обнаруженное событие (например, проведение сеансов радиозондирования с повышенной скоростью перестройки частоты, причем в нужном диапазоне частот). Причем при корректировке режимов (расписания) измерений может потребоваться связь с другими пунктами зондирования (если зондирование наклонное, т.е. передатчик и приемник разнесены на тысячи километров), при такой схеме эксперимента экосистема (или её части) должна быть развернута на всех пунктах сети зондирования. Пример события: «Зафиксирована вспышка класса X5».

Другим сценарием может быть генерация и уточнение научных гипотез в диалоговом режиме с человеком-исследователем не в реальном времени измерительного эксперимента (хотя и первый сценарий не исключает возможности ведения диалога с человеком на естественном языке, например при формулировке и уточнении гипотез, но в первом сценарии всё направлено на оперативное изменение режимов измерений). Радиофизические измерения генерируют колоссальный объем данных (сотни терабайт сырых отсчетов с выходов приемных устройств, терабайты ионограмм). Этот сценарий включает интеллектуальную постобработку, где система выступает в роли аналитического центра, способного выявлять скрытые закономерности в архивах данных объемом в терабайты. Ну и разумеется, система берет на себя базовую обработку данных (сбор, очистку от шумов, базовую классификацию), позволяя исследователю сосредоточиться на интерпретации физических смыслов. Исследователь может сам начать диалог с фраз вроде «Найди в данных за прошлую неделю все случаи появления спорадического слоя E (Es), которые не коррелируют с магнитными возмущениями» или «посмотри на корреляцию критической частоты foF2 и данных полного электронного содержания за месяц». А можно поручить агенту постоянный поиск скрытых зависимостей в данных, тогда начало диалога может инициироваться агентом. Причем агент, имея доступ к локальной базе знаний и научным публикациям через внешние API, может выдвигать гипотезы, объясняющие обнаруженные закономерности (или аномалии) в данных.

В обоих описанных сценариях ключевым элементом является активная роль агента. Он не ждет запроса, а «живет» в данных, предлагая исследователю готовые решения. Это позволяет исследователю работать на уровне смыслов и стратегий, оставляя рутину и мониторинг состояния эфира интеллектуальной системе.

Функциональные блоки системы можно сгруппировать по 8 основным частям.

1. Измерения, регистрация и управление аппаратурой. Получение первичных радиофизических данных и их сохранение, управление режимами измерений.

2. Предварительная обработка данных радиозондирования, главным образом – ионограмм. Подготовка данных к дальнейшему анализу, устранение артефактов и помех, формирование пригодного для анализа представления ионограмм. В этой части обработка происходит классическими алгоритмами цифровой обработки сигналов, без привлечения аппарата теории обучения машин.

3. Низкоуровневое машинное обучение. Автоматическое обнаружение и выделение структур на ионограммах: прежде всего треков, но и других объектов.

4. Высокоуровневое машинное обучение: анализ, знания и прогнозирование. Переход от отдельных обнаруженных объектов к параметрам, закономерностям, временной динамике, гипотезам и знаниям об исследуемом объекте.

5. Архивы данных зондирования, и другие данные (например, первичная разметка данных для машинного обучения).

6. Характеристики ионосферы и ионосферных радиолиний. Формирование из результатов зондирования характеристик состояния ионосферы и их связи с распространением радиоволн по конкретным радиолиниям.

7. Имитационное и физическое моделирование распространения радиоволн и исследование вариантов построения и функционирования радиосистем.

8. Ассистент исследователя. Организация взаимодействия компонентов, постановка задач, формирование гипотез, запуск расчётов и измерений, анализ результатов и планирование следующего шага исследования.

При этом части 1–6 образуют эмпирический контур, часть 7 – модельный контур, а часть 8 – когнитивный контур, связывающий их в единый исследовательский процесс.

Рассмотрим подробнее часть 6. Она получает обработанные данные зондирования, т.е. не сырые ионограммы, а выделенные треки парциальных мод ионосферного распространения коротких волн, информацию о помехах различных типов, а также о доплеровском смещении на различных частотах. По полученным данным в части 6 производится вычисления характеристик ионосферы, условий распространения радиоволн, характеристик многолучевых ионосферных радиолиний (например, их амплитудно-частотных характеристик), а также расчёт более специфичных параметров, необходимых для корректного функционирования радиотехнических систем декаметрового диапазона с учетом текущей гелио и геофизической обстановки. Например, для систем загоризонтной радиолокации частью 6 может быть обеспечены: формирование признака состояния трассы локации «нормальна»/«аномальна»; прогноз азимутальных и дальностных параметров каждой парциальной зоны (элементарных участков), образующих текущую зону обнаружения; прогноз азимутальных и дальностных параметров зон непрерывного контроля; прогноз ширины диапазона оптимальных рабочих частот и его положения на оси частот на радиолокационных трассах каждой из парциальных зон обнаружения и каждой из зон непрерывного контроля; прогноз интервала времени стационарности ионосферного радиоканала; прогноз полосы частот когерентности ионосферного радиоканала; прогноз величины угла места прихода радиолокационных сигналов на частотах, принадлежащих диапазонам оптимальных рабочих частот каждой парциальной зоны обнаружения и зонам непрерывного контроля, и др.

Описанная система находится в стадии разработки. Существующее программное обеспечение интегрируется и/или переписывается в новой архитектуре (в первую очередь это касается подсистемы регистрации данных в реальном времени), а также идут многочисленные эксперименты с большими языковыми моделями.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИЗМИРАН (тема № FFUM-2026-0010).

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА, ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

А. А. Александров[1], А. Ю. Куклев[1,2,3], В. И. Струнин[1,3], Н. А. Чириков[1,2]
[1]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[3]Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛАРМОРОВСКОГО РАДИУСА ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

Аннотация. Исследована зависимость ларморовского радиуса электронов в плазме магнетронного разряда от расстояния до центра мишени при мощности разряда 400–700 Вт на двух алюминиевых мишенях, на одной из которых уже сформировалась зона эрозии, а на другой отсутствовала. Количественная оценка показала, что, хотя мощность магнетронного разряда и влияет на величину ларморовского радиуса, она не оказывает влияния на характер пространственного распределения величины ларморовского радиуса.
Ключевые слова*:* ларморовский радиус, магнетронное распыление, магнитное поле, физика плазмы, электронная температура.
Для цитирования*:* Александров А. А., Куклев А. Ю., Струнин В. И., Чириков Н. А. Исследование пространственного распределения ларморовского радиуса электронов в плазме магнетронного разряда// Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск :ОНИИП, 2026.

A. A. Alexandrov[1], A. Yu. Kuklev[1-3], V. I. Strunin[1,3], N. A. Chirikov[1,2]
[1]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[3]Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRON LARMOR RADIUS IN A MAGNETRON DISCHARGE PLASMA

Abstract. The paper examines the dependence of the Larmor radius of electrons in the plasma of a magnetron discharge on the distance to the center of the target at discharge powers of 400 W–700 W, using two aluminum targets, one of which already had an erosion zone formed, while the other had no erosion zone. Quantitative assessment showed that although the magnetron dis-

charge power affects the magnitude of the Larmor radius, it does not affect the nature of the spatial distribution of the Larmor radius.
***Keywords**:* Larmor radius, magnetron sputtering, magnetic field, plasma physics, electron temperature.
***For citation**:* Alexandrov A. A., Kuklev A. Yu., Strunin V. I., Chirikov N. A. Investigation of the spatial distribution of the electron Larmor radius in a magnetron discharge plasma // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Магнетронное распыление является весьма перспективным методом получения тонких пленок. Это обусловлено высокой степенью контролируемости параметров распыления, отсутствию необходимости в высоких температурах и возможности напыления широкого класса материалов. Однако качество тонких пленок, получаемых методом магнетронного распыления, сильно зависит от условий распыления, к которым относятся мощность магнетронного разряда, давление в камере, температура подложки и другие характеристики среды распыления.

Важными факторами процесса распыления являются характеристики плазмы магнетронного разряда. Для эффективного процесса распыления необходима высокая эффективность ионизации, обеспечивающая достаточный поток налетающих на мишень ионов. Эффективность ионизации зависит от частоты столкновений электронов с атомами ионизируемого газа, а значит и от ларморовского радиуса электронов в магнитном поле магнетрона, от которого зависит эффективность удержания электронов в плазме разряда. Величина магнитной индукции, от которой зависит величина ларморовского радиуса, имеет в магнетронной системе неравномерное пространственное распределение, увеличиваясь в зоне разряда, а значит поток налетающих на подложку распыленных атомов мишени связан с пространственным распределением ларморовского радиуса через распределение магнитной индукции. Ларморовский радиус также зависит от температуры электронов, а значит и от мощности магнетронного разряда.

Целью данной работы является получение пространственного распределения величины ларморовского радиуса при различных значениях мощности магнетронного разряда.

Для количественной оценки величины ларморовского радиуса были проведены измерения индукции магнитного поля и температуры электронов в пяти точках на разном расстоянии от центра мишени. Значение магнитной индукции определяли при помощи тесламетра WT10A. Температура электронов определялась при момощи двойного ленгмюровского зонда.

Измерения температуры и концентрации электронов проводились при мощности магнетронного разряда 400–700 Вт, давлении 0,07 Па и потоке аргона 10 sccm. Двойной электрический зонд располагался в 40 мм от поверхности мишени по оси Z. После измерения индукции магнитного поля и температуры электронов были вычислены значения ларморовского радиуса электронов. Полученные значения колеблются от долей миллиметра до нескольких миллиметров на обеих мишенях. Примечательно, что графики зависимости ларморовского радиуса от радиального положения зонда имели практически идентичный вид: минимум и максимум всегда приходились на 3,5 и 7,5 мм соответственно. Это согласуется с полученными значениями магнитной индукции, максимум которой приходится на 3,5 мм, а минимум – на 7,5 мм. На рисунке приведен пример зависимости ларморовского радиуса и величины магнитной индукции от радиального положения зонда.

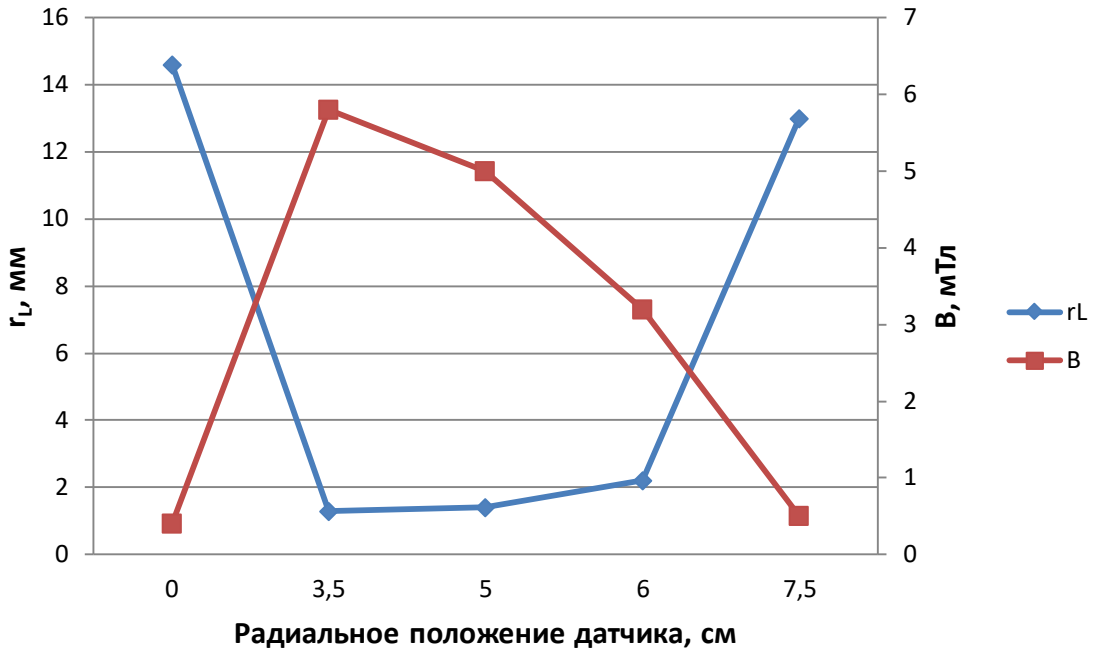


График зависимости ларморовского радиуса и магнитной индукции от радиального положения зонда при мощности магнетронного разряда 400 Вт

В данной работе был проведен анализ зависимости ларморовского радиуса от расстояния до центра мишени. Наличие или отсутствие зоны эрозии слабо влияет на распределение и порядок величины ларморовского радиуса. Распределение ларморовского радиуса по радиальному расстоянию от центра мишени не зависит от мощности разряда, а только от величины магнитной индукции. Как и ожидалось, наибольшему значению магнитной индукции соответствует наименьшее значение ларморовского радиуса и наоборот, наименьшему значению магнитной индукции во всех измерениях соответствовала наибольшая величина ларморовского радиуса.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 124022500291-6).

А. М. Бадамшин[1], В. С. Ковивчак[2], Е. В. Князев[1]
[1]Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация
[2]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Аннотация. Исследовано влияние мощного импульсного ионного пучка состава 30% H^+ и 70% C^+ с энергией частиц E ≈ 250 кэВ и плотностью ионного тока 150 А/см^2 на изменение структуры и микротвердости поверхностных слоёв инструментальной эвтектоидной стали У8. Методом растровой электронной микроскопии установлено, что облучение приводит к плавлению поверхности стали. С использованием химического травления выявлено, что при малом числе импульсов происходит измельчение феррито-цементитной структуры, а при облучении 15 импульсами формируется мартенситная структура. Показано, что наибольшее увеличение микротвердости (до ~58 HRC) достигается после 15 импульсов, толщина модифицированного слоя составляет до ~4 мкм. Предложен механизм образования кратеров на поверхности, связанный с локальным перегревом цементита.
Ключевые слова: инструментальные стали, мартенсит закалки, ионно-пучковое модифицирование, мощный ионный пучок.
Для цитирования: Бадамшин А. М., Ковивчак В. С., Князев Е. В. Изменение структуры и свойств поверхностного слоя инструментальной стали под действием мощного ионного пучка наносекундной длительности // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. M. Badamshin[1], V. S. Kovivchak[2], E. V. Knyazev[1]
[1]Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

CHANGES IN THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SURFACE LAYER OF TOOL STEEL UNDER THE INFLUENCE OF A POWERFUL NANOSECOND-DURATION ION BEAM

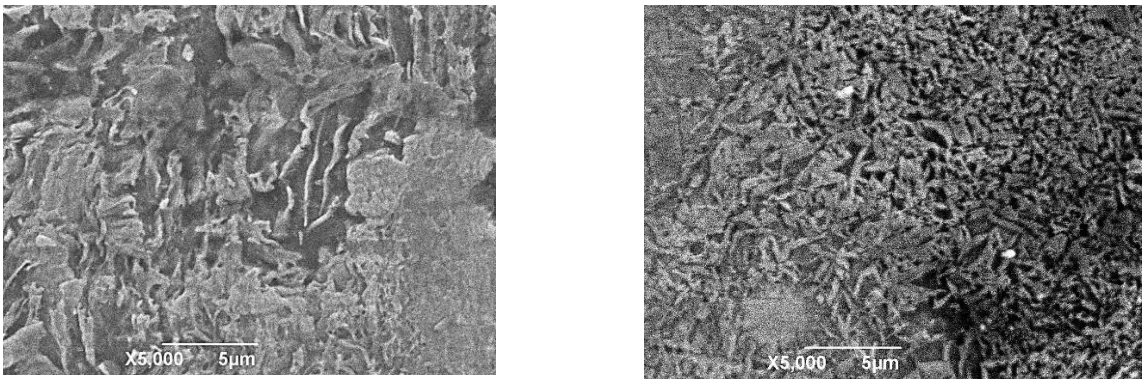
Abstract. The paper studies the effect of a high-power pulsed ion beam consisting of 30 % H^+ and 70 % C^+, with a particle energy of E ≈ 250 keV and ion current density of 150 A/cm^2, on the change in the structure and microhardness of the surface layers of tool eutectoid steel U8. Scanning electron microscopy shows that irradiation leads to melting of the steel surface. Using chemical etching, it was found that with a small number of pulses, the ferrite-cementite structure is finer, while irradiation with 15 pulses results in the formation of a martensite structure. It has been shown that the greatest increase in microhardness (up to ~58 HRC) is achieved after 15 pulses, and the thickness of the modified layer is up to ~4 μm. The paper also proposes a mechanism for formation of craters on the surface, associated with local overheating of cementite.
Keywords: Tool steels, quenched martensite, ion beam modification, high-power ion beam.
For citation: Badamshin A. M., Kovivchak V. S, Knyazev E. V. Changes in the structure and properties of the surface layer of tool steel under the influence of a powerful nanosecond-duration ion beam // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Обработка импульсными концентрированными потоками энергии является перспективным методом упрочнения поверхностных слоёв сталей и сплавов. Преимуществом мощных ионных пучков наносекундной длительности перед традиционной объёмной закалкой является отсутствие окалины и коробления, а также возможность упрочнения тонких поверхностных слоёв при сохранении вязкости сердцевины. Целью работы является исследование изменения структуры и твёрдости поверхностных слоёв инструментальной стали У8 после облучения ионным пучком.

Образцы стали У8 (0,8% С) после отжига облучались на ускорителе «Темп» (30% H^+ + 70% C^+, E ≈ 250 кэВ, τ ≈ 60 нс, j ≈ 150 А/см^2) с числом импульсов n = 1, 5 и 15. Интервал между импульсами составлял не менее 10 с для исключения остаточного нагрева. Исследования проводились методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) с химическим травлением в 6% растворе HNO_3 в этаноле, микротвердость измерялась по Виккерсу при нагрузке 98 мН с пересчётом в HRC.

На рисунке представлены РЭМ-изображения поверхности стали в исходном состоянии (*а*) и после облучения 15 импульсами (*б*). В исходном состоянии микроструктура представляет собой дисперсный пластинчатый перлит. После облучения одним импульсом наблюдается «размытие» границ между фазами, что свидетельствует о плавлении и быстрой кристаллизации. При этом, после проведения химического травления поверхности однократно облученного образца наблюдалось измельчение компонентов структуры стали, что связано с сверхбыстрым охлаждением расплава после воздействия пучка. Пятикратное воздействие ионного пучка приводило к формированию на поверхности ярко выраженных кратеров, что может быть связано с низкой теплопроводностью цементита, его локальным перегревом, разложением Fe_3C и вскипанием жидкого железа.

При облучении 15 импульсами (рис. *б*) на поверхности после травления наблюдается игольчатая структура, характерная для мартенсита закалки. Формирование мартенсита объясняется накоплением дефектов и измельчением структуры при первых импульсах, что облегчает аустенизацию при сверхбыстром нагреве, а последующее охлаждение приводит к мартенситному превращению.



а ***б***

Микроизображения поверхности стали У8: (а) в исходном состоянии, (б) после облучения мощным ионным пучком с числом импульсов n = 15

Микротвердость исходного образца составляла ~15 HRC. После 1 импульса существенного увеличения микротвердости не зафиксировано. При n=5 твердость возросла до ~32 HRC, что связано с измельчением структуры. Максимальное значение (~58 HRC) достигнуто после 15 импульсов, что коррелирует с формированием мартенсита и соизмеримо с объёмной закалкой. Толщина модифицированного слоя, определённая по поперечному шлифу, составила до ~4 мкм, что превышает глубину отпечатка индентора (~2–2,5 мкм), обеспечивая достоверность измерений.

Таким образом, многоимпульсная обработка стали У8 мощным ионным пучком (n=15) является эффективным методом поверхностного упрочнения, позволяющим формировать мартенситную структуру в слое микронной толщины с микротвердостью до 58 HRC.

К. С. Бакланова[1], А. Г. Козлов[2], М. Г. Потуданская[1]
[1]Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского
Омск, Российская Федерация
[2]Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

Аннотация. Представлен опыт применения датчиков плотности теплового потока типа «дополнительная стенка» для изучения процессов теплообмена на поверхности тела человека. В 12 зонах каждого из предплечий были определены поверхностная температура и плотность теплового потока, рассчитаны коэффициенты теплоотдачи. Определена относительная систематическая погрешность датчика, которая составила не больше 5%, и сопоставлена с естественным разбросом параметров. Полученные результаты показывают, что датчик пригоден для изучения тепловых процессов на поверхности тела человека.
Ключевые слова*:* тепловой поток, датчик плотности теплового потока, коэффициент теплоотдачи, температура поверхности, поверхность тела человека.
Для цитирования*:* Бакланова К. С., Козлов А. Г., Потуданская М. Г. Использование датчиков плотности теплового потока для теплофизических исследований поверхности тела человека // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

K. S. Baklanova[1], A. G. Kozlov[2], M. G. Potudanskaya[1]
[1]Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

USE OF HEAT FLUX DENSITY SENSORS FOR THERMOPHYSICAL STUDIES OF A HUMAN BODY SURFACE

Abstract. The study presents experience in using "additional wall" type heat flux density sensors to investigate heat exchange processes on the surface of the human body. Surface temperature and heat flux density were measured, and heat transfer coefficients were calculated for 12 zones on each forearm. The relative systematic error of the sensor was determined to be no more than 5% and was compared with the natural variation of the parameters. The results demonstrate that the sensor is suitable for studying thermal processes on the human body surface.
Keywords*:* heat flux, heat flux density sensor, heat transfer coefficient, surface temperature, human body surface*.*
For citation*:* Baklanova K. S., Kozlov A. G., Potudanskaya M. G. Use of heat flux density sensors for thermophysical studies of a human body surface // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

I. Введение

Одной из важных систем, обеспечивающих поддержание жизнедеятельности организма человека, является система терморегуляции. Система терморегуляции поддерживает постоянство температуры человеческого организма. Важным звеном этой системы является теплообмен между кожей человека и окружающей средой. Основой для понимания и контроля над процессами теплообмена между телом человека и окружающей

средой является не только определение поверхностной температуры тела, но и определение плотности теплового потока, коэффициента теплоотдачи. Эти параметры важны для решения задач медицинского профиля – оценка подкожной микроциркуляции, и для прикладных задач – разработка комфортной одежды, оценка реакции организма на внешние факторы, спортивный мониторинг.

Плотность теплового потока, как интегральная величина, является более сложной в измерении и определении величиной. Измерение температуры в лабораторных условиях можно произвести с погрешностью порядка 0,3%, тогда как измерение плотности теплового потока обеспечивает относительную погрешность около 10%.

Изучением теплообмена на локальных участках тела человека учёные заинтересовались более 60 лет назад, но данная проблема актуальна и по сей день. Применяемые для этого датчики плотности теплового потока типа «дополнительная стенка» производят измерение разности температур между контактирующей с объектом и окружающей средой поверхностями. Но такие датчики вносят систематическую погрешность в естественный теплообмен из-за собственного термического сопротивления и наличия краевых эффектов. Также неоднородность температуры кожи дополнительно искажает результаты. Это требует дальнейших экспериментальных исследований для уточнения методики измерений.

Целью работы является экспериментальное изучение распределения плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи вдоль поверхности предплечья человека с помощью датчика плотности теплового потока типа «дополнительная стенка» и оценка его систематической погрешности.

II. Методика исследования

Измерения температуры и плотности теплового потока проводились на внутренней стороне правого и левого предплечий одного испытуемого. Предплечье было разделено на 12 одинаковых зон (рис.1). В каждой из зон с помощью тепловизора ПЕРГАМЕД получали матрицу температуры размером 11×11 пикселей, затем проводили вычисления средней температуры поверхности. В то же время на исследуемую зону накладывали термоэлектрический датчик теплового потока типа «дополнительная стенка» ДТП 0924-Э-Д-27-0, диаметром 27 мм, толщиной 2 мм, чувствительностью 43-47мкВ/(Вт/м^2), с диапазоном измерений 10-1000 Вт/м^2. Относительная погрешность датчика по паспорту составляет ≤8 %.

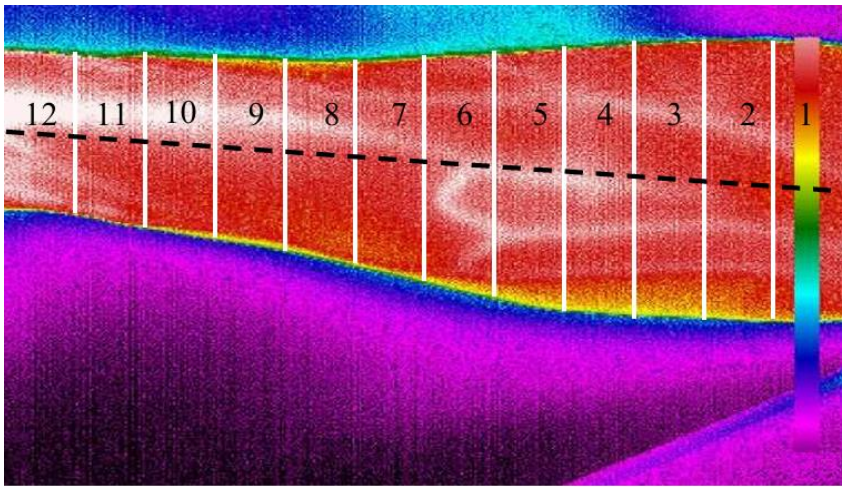


Рис. 1. *Термограмма внутренней поверхности правого предплечья с разделением на зоны*

Далее были получены данные плотности теплового потока каждой из зон с поверхности двух предплечий и вычислен коэффициент теплоотдачи. Систематическую погрешность датчика рассчитывали с помощью двумерной тепловой модели системы

«датчик – участок тела» как относительное различие между плотностью теплового потока, проходящего через датчик, и от открытой поверхности.

III. Результаты и обсуждение

Средняя поверхностная температура в зонах левого предплечья выше, чем правого на 0,8-1,9 °С. Аппроксимация полиномом третьей степени показывает, что температура незначительно снижается к локтю, затем остаётся практически постоянной (зоны 4-9) и уменьшается к запястью. Средняя температура по всем зонам для левого предплечья составляет 32,89 °С, для правого – 31,43 °С.

Среднее значение плотности теплового потока также выше в зонах левого предплечья, чем в зонах правого, особенно это заметно в дистальной части(рис.2). Максимум теплового потока на левом предплечье наблюдается в 8 зоне ближе к запястью, на правом предплечье – в зоне 4 ближе к локтю. Минимумы температуры просматриваются у локтя и запястья. Среднее значение теплового потока по всем зонам для левого предплечья – 40,18 Вт/м^2, для правого предплечья – 32,77 Вт/м^2. Стандартное отклонение составило 6,97 и 4,71 Вт/м^2 соответственно, что дает относительное среднеквадратичное отклонение 17,3% и 14,4%.

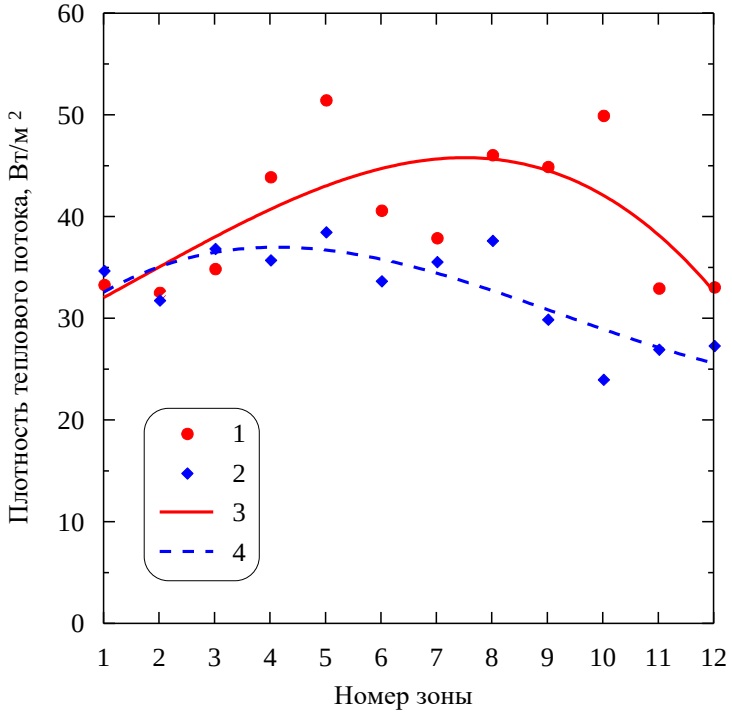


Рис. 2. *Значения плотности теплового потока в зонах предплечий: 1 – левое предплечье, 2 – правое предплечье, 3, 4 – аппроксимация для левого и правого предплечий соответственно*

Коэффициент теплоотдачи коррелирует с плотностью теплового потока на левом предплечье в зоне 7 и на правом предплечье в зоне 4. В зонах 1–4 коэффициент выше на правой руке, а в зонах 5–12 на левой. Средние значения составляют для левого предплечья: 3,38 Вт/(К·м^2), для правого предплечья – 3, 14 Вт/(К·м^2). Относительное среднеквадратичное отклонение находится в диапазоне от 14% для правого предплечья и до 16,9% для левого предплечья.

Систематическая погрешность для датчика рассчитывалась по модели с параметрами $T_{окр}$=21 °С, средняя температуры кожи, теплопроводность датчика – 0,6 Вт/(К·м), коэффициент конвекции – 3,5 Вт/(К·м^2) и составила 4,78% для левого предплечья и 4,71% для правого. Эти величины значительно меньше среднеквадратичных отклонений измеренных плотностей теплового потока. Установлено, что доминирующий вклад обусловлен пространственной неоднородностью температуры поверхности.

IV. Заключение

Проведённые исследования демонстрируют, что датчики плотности теплового потока типа «дополнительная стенка» могут быть использованы для измерения локальных тепловых потоков на поверхности тела человека. Их относительная систематическая погрешность ≤ 5%, что значительно меньше разброса из-за естественной неоднородностью температуры кожи. Получены распределения плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи вдоль предплечий, выявлены асимметрия между левым и правым предплечьями и зоны экстремумов температуры. Практическая значимость работы заключается в возможности создания мобильных систем мониторинга теплообмена для неинвазивной оценки микроциркуляции крови и для ранней диагностики диабетической ангиопатии нижних конечностей.

П. П. Бобров[1,2], Ю. А. Костычов[2], О. В. Родионова[1]
[1]Омский государственный педагогический университет
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

ЯЧЕЙКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКОСТЕЙ И ПОЧВ НА ОСНОВЕ ОТРЕЗКА МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

Аннотация. Представлены результаты исследования простой в изготовлении диэлектрической ячейки, рабочей частью которой является полосок на подложке из диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью. Благодаря этому значительная часть энергии электромагнитного поля сосредоточена в измеряемом образце, а ширина полоска значительно превышает размеры почвенных частиц. Для калибровки используются жидкости с известной диэлектрической проницаемостью. Диапазон частот ячейки1 МГц – 2,7 ГГц.
Ключевые слова*:* диэлектрические измерения, микрополосковая линия, фторопласт, калибровочные жидкости, почвы.
Для цитирования*:* Бобров П. П., Костычов Ю. А., Родионова О. В. Ячейка для измерения диэлектрической проницаемости жидкостей и почв на основе отрезка микрополосковой линии // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

P. P. Bobrov[1,2], Yu. A. Kostychov[2], O. V. Rodionova[1]
[1]Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

CELL FOR MEASURING PERMITTIVITY OF LIQUIDS AND SOILS BASED ON SECTION OF MICROSTRIP LINE

Abstract. The report presents the results of a study of an easy-to-manufacture dielectric cell, the working part of which is a strip laying on a dielectric substrate with a low permittivity. Due to this, a significant part of the electromagnetic field energy is concentrated in the measured sample and the width of the strip significantly exceeds the size of the soil particles. Fluids with known permittivity are used for calibration. The operating frequency range of the cell extends from 1 MHz to 2,7 GHz.
Keywords*:* dielectric measurements, microstrip line, teflon, calibration fluids, soils.
For citation*:* Bobrov P. P., Kostychov Yu. A., Rodionova O. V. Cell for measuring permittivity of liquids and soils based on section of microstrip line // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Измерения диэлектрической проницаемости почв проводятся чаще всего для измерения влажности и пористости. В связи с развитием методов измерения в широкой полосе частот были обнаружены релаксационные процессы, приводящие к значительному увеличению действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости. Эти процессы наиболее сильно проявляются в глинистых почвах, особенно при высоком содержании растворимых солей. В методах широкополосных измерений

чаще всего используются ячейки в виде отрезков коаксиальных линий, иногда в комбинации с ячейками в виде открытого конца коаксиальной линии. Применение коаксиальных ячеек для измерения жидкостей требует герметизации рабочей области, заключенной между диэлектрическими шайбами. Изготовление таких ячеек требует высокой точности и является дорогостоящим, поэтому актуальным является разработка простых в изготовлении дешевых ячеек. Ниже представлены результаты исследования ячейки на основе отрезка микрополосковой линии.

Обычно в микрополосковых линиях используют диэлектрики с высокой действительной (ε'_r) и низкой мнимой частями (ε''_r) диэлектрической проницаемости, чтобы основная часть энергии электромагнитного поля концентрировалась в подложке и потери энергии были бы минимальными. В линии, используемой для измерения ε' и ε'' образца, накладываемого на линию, значения ε'_r и ε''_r должны быть минимальными, чтобы увеличить влияние образца на параметр матрицы рассеяния S_{12} отрезка и уменьшить влияние собственных потерь линии на измерение ε''. Такими параметрами обладают фторопласт и диэлектрики на его основе.

Нами в качестве подложки использовался ФАФ-4Д с $\varepsilon'_r = 2{,}5$ и $tg\delta = 1 \cdot 10^{-3}$. На рис. 1 представлен общий вид ячейки, выполненной на подложке толщиной 2 мм. Ширина полоска составляет 5,85 мм, длина 60 мм.

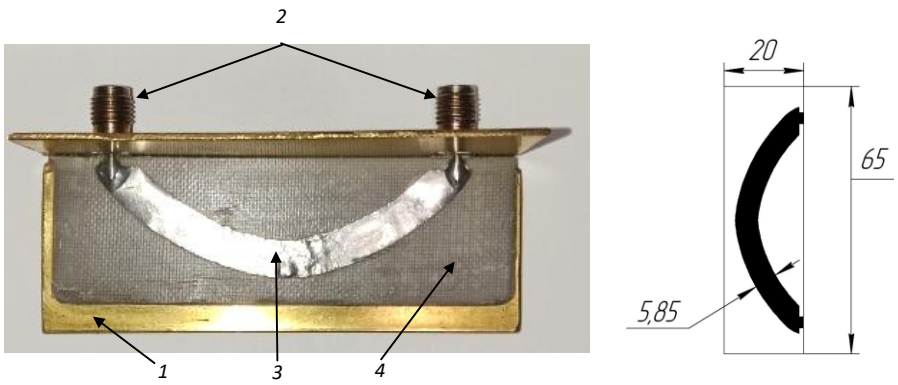


Рис. 1. *Общий вид ячейки(слева) и ее размеры (справа):*
1 – корпус; 2 – СВЧ разъемы; 3 –полосок; 4 - подложка

Для измерений ячейка погружается в жидкость или втыкается в почву до фланца, на котором расположены разъемы (в лабораторных условиях почва может накладываться на линию). При измерениях комплексного коэффициента передачи (элемента матрицы рассеяния S_{12}) в лаборатории использовался векторный анализатор цепей Rohde & Schwarz ZNB20, в полевых условиях – SV4401A. Явные методы восстановления диэлектрической проницаемости среды вокруг МПЛ по измеренным *S*-параметрам отсутствуют. Единственным способом измерений является применение регрессионных методов анализа.

Для получения регрессионных уравнений для зависимостей фазы и амплитуды коэффициента передачи от диэлектрической проницаемости среды, окружающей ячейку, производилась калибровка последней. Для этого в 15-20 частотных точках измерялся параметр S_{12} при погружении рабочей части ячейки в жидкости с известными значениями ε' и ε''. Использовались трансформаторное масло (ε' изменяется от 2,26 на частоте 0,5 МГц до 2,20 на частоте 2,7 ГГц), изопропиловый спирт с концентрацией чистого вещества 99,9% (ε' изменяется от 19,1 до 3,98), ацетон с концентрацией 99,9% (ε' изменяется от 21,0 до 18,9), этиловый спирт с концентрацией 95% (ε' изменяется от 27,5 до 6,81), диметилсульфоксид с концентрацией 99% (ε' изменяется от 48,5 до 44,4), дистиллированная вода (ε' изменяется от 79,2 до 77,6), а также вода с содержанием соли NaCl с концентрацией от 0,1 до 3 г/л. Температуры жидкостей поддерживались при 23–24°С.

При измерениях почв и жидкостей по значениям фазы и амплитуды коэффициента передачи с помощью регрессионных уравнений на соответствующих частотах определялись значения ε’ и ε’’ измеряемого объекта.

На рис. 2 приведены результаты измерения диэлектрической проницаемости технического ацетона и ее модельные значения (модель Дебая), параметры которой подобраны для наилучшего соответствия экспериментальным данным. В отличие от модели чистого ацетона статическая проницаемость уменьшилась от 21.1 до 17,4, время релаксации возросло от 0,2 до 0,3 пс, удельная проводимость возросла до 10,5 мСм/м при проводимости чистого ацетона 0,12 мСм/м. Статическая проницаемость и удельная проводимость определяются достаточно точно, так как в диапазоне от 1 до 10 МГц измеренные значения ε’ и ε’’ практически точно совпадают с модельными значениями. Отклонение измеренных значений ε’ технического ацетона от модельных на частотах 26,6 и 100 МГц не превышают 3%, а на частотах выше 1 ГГц – 10 %. Ниже 1 МГц погрешность возрастает по причине очень малого отношения длины ячейки к длине волны.

Значения ε’’ в диапазоне 26–100 МГц и выше 1,5 ГГц измеряются с большой погрешностью. Такая же проблема существует и при измерении почв средней влажности. В этих случаях причиной является неточность калибровки. Калибровочные жидкости имеют значения ε’, более или менее равномерно распределенные в диапазоне от 2,2 до 78. Тогда как значения ε’’ равномерно распределены только в низкочастотной области, где калибровка проводится с использованием воды разной солености. В диапазоне частот 20–100 МГц значения ε’’ почв и технического ацетона меньше, чем у воды даже слабой солености и больше, чем у других калибровочных жидкостей. Регрессионные уравнения в этом диапазоне частот имеют невысокий коэффициент корреляции.

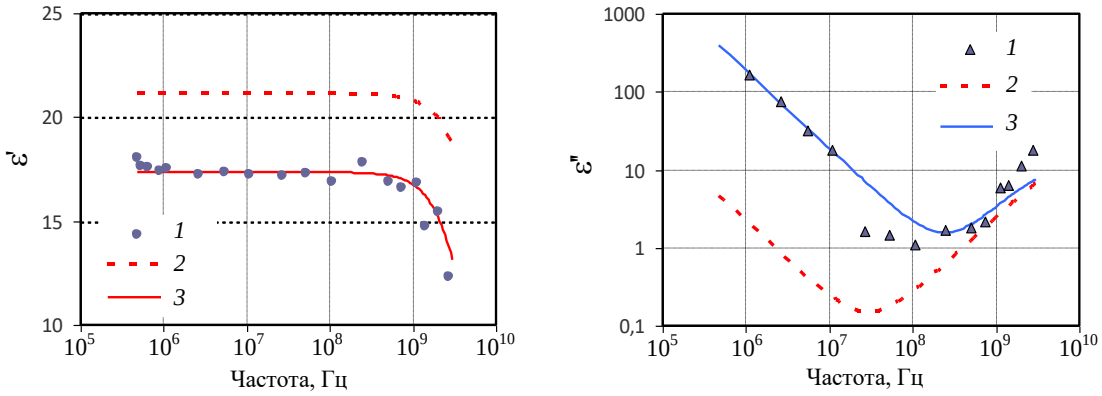


Рис. 2. *Действительная (ε') и мнимая (ε'') части диэлектрической проницаемости ацетона. 1– измеренные значения технического ацетона; 2 - модель чистого ацетона; 3 – модель технического ацетона*

Таким образом, данная ячейка обеспечивает удовлетворительную точность измерений действительной части диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 1 МГц до 2,7 ГГц и мнимой части – на частотах ниже 10 МГц и в диапазоне 0,5–1,2 ГГц. Этот недостаток не является критическим, так как значения ε’’ в промежуточном частотном диапазоне могут быть восстановлены с помощью моделей. Следует отметить ещё один недостаток: невозможность измерения значений ε’ более 80, тогда как почвы с большой влажностью на частоте 1 МГц могут иметь более высокие значения.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Д. А. Борейко[1], С. А. Подлиннов[2], О. И. Павлова[1], Т. С. Тимошенко[1], А. И. Тюменцев[1]
[1]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[2]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Томск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК МОНОАЛЮМИНАТА НЕОДИМА ($NdAlO_3$), ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Аннотация. Проведено исследование свойств моноалюмината неодима ($NdAlO_3$), представленного в виде тонких пленок, получаемых способом магнетронного напыления на жесткое основание. Приведены частотные зависимости относительной диэлектрической проницаемости (ε) материала и тангенса угла диэлектрических потерь (tanδ). Данная информация позволяет эффективно применять его в составе различных СВЧ-устройств.
Ключевые слова*:* тонкопленочные технологии, магнетронное напыление, прецизионная фотолитография, LC-фильтры, СВЧ.
Для цитирования*:* Борейко Д. А., Подлиннов С. А., Павлова О. И, Тимошенко Т. С., Тюменцев А. И. Исследование диэлектрических свойств тонких пленок моноалюмината неодима ($NdAlO_3$), полученных методом магнетронного напыления // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

D. A. Boreyko[1], S. A. Podlinnov[2], O. I. Pavlova[1], T. S. Timoshenko[1], A. I. Tyumentsev[1]
[1]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[2]Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
Tomsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF DIELECTRIC PROPETIES OF NEODYMIUM MONOALUMINATE ($NdAlO_3$) THIN FILMS OBTAINED BY MAGNETRON DEPOSITION

Abstract. The paper investigates dielectric properties of neodymium monoaluminate ($NdAlO_3$) thin films obtained by magnetron deposition. The report presents graphics of dielectric conductivity and dielectric loss tangent. According to the obtained data, the material can be effectively used in various UHF devices.
Keywords*:* thin-film technology, magnetron deposition, precision photolithography, LC filters, UHF.
For citation*:* Boreiko D.A., Podlinnov S.A., Pavlova O.I. and etc. investigation of dielectric propeties of neodymium monoaluminate ($NdAlO_3$) thin films obtained by magnetron deposition // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Одним из методов формирования чередующихся попеременно структур металл-диэлектрик является фотолитография материалов, представленных в виде тонких пленок толщиной 1–2 мкм. Для напыления слоев такой толщины широко применяется распыление веществ в вакуумной установке магнетронным способом, который позволяет контролировать протекание технологического процесса и выдерживать необходимые

параметры многослойной конструкции.

При этом особое внимание уделяется выбору материала диэлектрических слоев, так как он должен удовлетворять целому перечню технологических требований: целостность слоя и низкая пористость, высокая степень электрической изоляции, механической прочности, а также устойчивость к воздействию влаги и температуры. Помимо этого, материал должен обладать химической избирательностью, то есть вступать в реакцию только с определенным типом реагентов.

Одним из материалов, подходящим по приведенным выше параметрам, является моноалюминат неодима ($NdAlO_3$), который, к тому же, обеспечивает высокую удельную емкость тонкопленочных конденсаторов на его основе за счет высокой диэлектрической проницаемости. Это позволяет использовать его при проектировании радиоэлектронных устройств, однако отсутствие точной информации об электрических характеристиках материала затрудняет его применение в СВЧ-диапазоне.

Таким образом, целью данной работы является определение частотных характеристик тонких пленок $NdAlO_3$ в широком диапазоне частот.

Для определения электрических характеристик материала можно использовать конденсаторный или резонаторный способ. Первый из них подразумевает создание конденсатора большой емкости, с последующим измерением его номинального значения и вычисления относительной диэлектрической проницаемости ε по известным формулам. Исходя из этого, ранее был проведен соответствующий эксперимент с изготовлением опытного образца, в ходе которого косвенно было получено значение диэлектрической проницаемости равное ε=16 (на частоте 1 МГц).

Полученные данные в дальнейшем использовались для проектирования фильтров на основе тонкопленочных элементов (емкостей и индуктивностей), работающих в диапазоне до 500 МГц. В сочетании с итерационным подходом обеспечивалось хорошее соответствие параметров числовых моделей и опытных образцов разрабатываемых устройств. Однако для работы в диапазоне частот свыше 1 ГГц необходимо получение более точной информации о характеристиках материала, используемого в качестве диэлектрика.

Для решения поставленной задачи был применен второй способ (резонаторный). При его использовании важную роль играет толщина диэлектрика на поверхности которого формируются проводники определенной длины и ширины. Исследование распространения электромагнитных волн в такой системе позволяет получить необходимые данные. Таким образом, в ходе работы были изготовлены калибровочные наборы и системы линий передач, для измерения частотных характеристик тонких пленок $NdAlO_3$ (полученных методом магнетронного напыления).

Данные, полученные в ходе этих исследований, позволяют сделать следующие выводы. В переходной области (10-15 ГГц) значения величин диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь снижаются, а в диапазоне высоких частот (15-40 ГГц) характер их изменения стабилизируется.

Диэлектрическая проницаемость ε имеет значения от 11 до 14 в диапазоне частот до 40 ГГц, а тангенс угла диэлектрических потерь tanδ принимает значения от 0,1 до 0,3, стремясь к минимуму на высоких частотах (15-40 ГГц). Это обуславливает довольно большие потери энергии, особенно для устройств, работающих на относительно низких частотах (до 500 МГц).

Основываясь на полученных результатах был проведен анализ уже имеющихся электромагнитных моделей разработанных ранее фильтров нижних частот для работы на 300 МГц и 2500 МГц соответственно.

Амплитудно-частотные характеристики этих фильтров приведены на рис. 1 и 2, где сплошной линией показаны данные измерений, пунктирной – ранее разработанных моделей, штриховой – данные моделирования с уточненными значениями ε и tanδ.

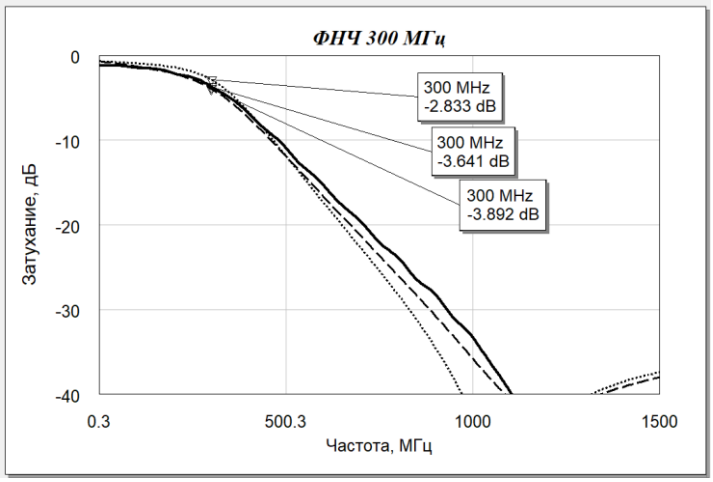


Рис. 1. *Амплитудно-частотная характеристика фильтра нижних частот на 300 МГц*

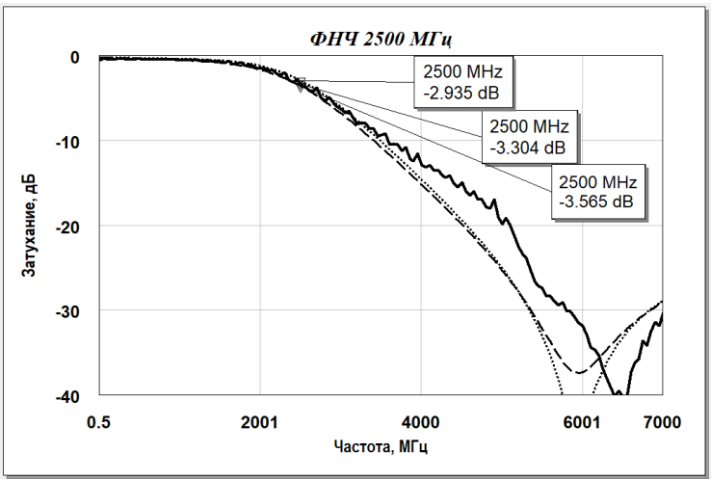


Рис. 2. *Амплитудно-частотная характеристика фильтра нижних частот на 2500 МГц*

Анализ рисунков позволяет установить, что большие потери энергии в материале приводят к отклонению частоты среза от расчетной, а также к искажениям амплитудно-частотной характеристики в высокочастотной области, которые выражаются в изменении уровня подавления сигнала в области полюсов затухания.

Для параметра ε определенно, что он принимает значения от 11 до 14 в диапазоне частот до 40 ГГц, что необходимо учитывать при проектировании устройств с частотно зависимыми элементами. Также установлено, что параметр tanδ соответствует довольно большим потерям энергии, что должно быть отражено в электромагнитных моделях при проектировании устройств на основе диэлектрика $NdAlO_3$.

С учетом приведенных выше рекомендаций $NdAlO_3$ может быть использован для разработки устройств, функционирующих на частотах до 40 ГГц.

С. А. Варнаков, Т. Б. Клименко, А. О. Никифорова, С. С. Коломоец
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПЕСКА В ОТДЕЛЬНЫХ ТИПАХ ПОЧВ НА ИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Аннотация. Приведены данные лабораторных измерений образцов почв, отобранных на территории Омской области. Показана зависимость действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости от содержания физического песка.
Ключевые слова*:* диэлектрическая проницаемость, подстилающая поверхность.
Для цитирования*:* Варнаков С. А., Клименко Т. Б., Никифорова А. О., Коломоец С. С. Оценка влияния содержания физического песка в отдельных типах почв на их диэлектрические характеристики // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

S. A. Varnakov, T. B. Klimenko, A. O. Nikiforova, S. S. Kolomoec
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF PHYSICAL SAND ON THE DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF CERTAIN TYPES OF SOILS

Annotation. Data from laboratory measurements of soil samples collected in the Omsk Region are presented. The dependence of the real and imaginary parts of the complex dielectric permittivity on the physical sand content is demonstrated.
Keywords*:* dielectric permittivity, underlayer surface.
For citation*:* Varnakov S. A., Klimenko T. B., Nikiforova A. O., Kolomoec S. S. Assessment of the influence of the content of physical sand in certain types of soil on their dielectric characteristics // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Диэлектрические характеристики почв играют важную роль при решении многих задач, требующих интерпретации полученных эмпирических данных в область практического применения. В частности, по данным дистанционного зондирования Земли можно оценить влажность почвы, провести картографирование земельных ресурсов. При проведении электромагнитных исследований данные о характеристиках подстилающей поверхности позволяют оценить эффективность распространение радиоволн.

Существует несколько моделей влажных почв, позволяющих описывать их диэлектрические характеристики, однако все они носят полуэмпирический характер и предназначены в основном для СВЧ диапазонов волн. Наиболее распространенной является рекомендуемая международным союзом электросвязи модель Добсона, разработанная на основе экспериментальных данных полученных для нескольких типов почв на частотах

выше 1 ГГц. Отбор образцов почв для этой модели осуществлялся на территории Североамериканского континента, классификация проводилась по гранулометрии на основе треугольника Ферре. В России принята классификация почв по гранулометрическому составу разработанная Н.А. Качинским. Различия в классификациях почв, принятых в разных странах, а также отсутствие моделей, позволяющих достоверно оценить их диэлектрические характеристики, особенно в диапазоне волн от 3 МГц до 1 ГГц делает актуальной задачу накопления эмпирических данных о комплексной диэлектрической проницаемости различных образцов влажных почв.

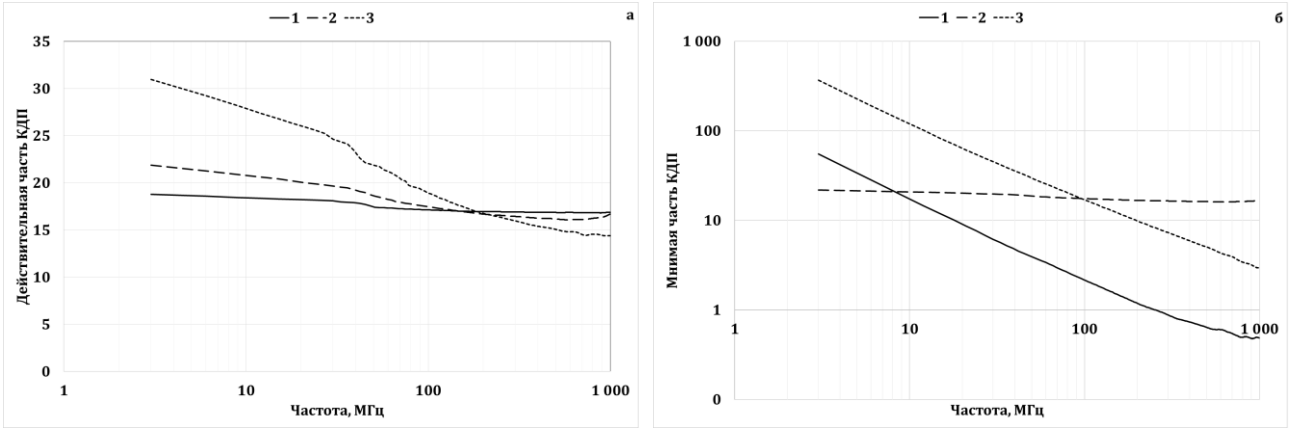
Целью данного исследования является получение и анализ диэлектрических спектров 3 образцов почв с различным содержанием физического мелкого песка, отобранных на территории Омской области.

При измерениях применялась методика, разработанная сотрудниками Лаборатории диэлькометрии и петрофизики ОмГПУ на базе совместной Лаборатории Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН и Омского НИИ приборостроения. Она позволяет проводить измерения в широком диапазоне частот без нарушения структуры измеряемого образца. Влажность образцов почв определялась термостатно-весовым методом.

Отбор образцов осуществлялся в 3 точках Омской области: пойма р. Иртыш вблизи поселка Ачаир (образец №1), пойма р. Иртыш на левом берегу Новотроицкого сельского поселения (образец №2), северная граница д. Ярославка Атрачинского сельского поселения, Тюкалинского района (образец №3). Содержание физического мелкого песка в отобранных образцах варьируется в пределах от 39,2 до 83,7%.

Горизонты, находящиеся ниже 20 см от поверхностного слоя, преимущественно являются засоленными. С целью исключения влияния засоления на диэлектрические характеристики изучаемых образцов почв было принято решение ограничить исследование только верхним горизонтом в пределах 10 см от поверхностного слоя.

На рисунке представлена зависимость действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости образцов почв от частоты для влажности 30±0,8%.



Частотная зависимость действительной (а) и мнимой (б) частей КДП при относительной влажности 30%:
1 – песчаная почва; 2 – пойменная почва; 3 – серая лесная почва

Анализ приведенных на рисунках графиков показывает, что с увеличение доли физического песка происходит снижение как действительной, так и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости образцов почв. Действительная часть всех трех образцов непрерывно возрастает с понижением частоты, а её значения и крутизна возрастания по образцам однозначно коррелируются с процентным содержанием в почвах физического песка. Мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости в целом показывает аналогичные зависимости, имеет монотонный характер небольшого возрастания вплоть до частоты 100 МГц, за исключением образца №3, потери в котором

резко возрастают в низкочастотном диапазоне и связаны с более крупным размером, входящих в состав почвы частиц и соответственно большим количеством связанной воды.

В результате проведенных работ были получены новые диэлектрические спектры образцов почв Омской области с различным содержанием физического песка. Результаты могут быть применены при уточнении эмпирически полученных коэффициентов в диэлектрической модели влажных почв.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Омской области в рамках гранта РНФ № 26-12-20019.

О. А. Гулевич[1,2], Л. Б. Волкомирская[1], А. Е. Резников[1]
[1]Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Российская Федерация
[2]ООО «Таймер», Москва, Российская Федерация

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИНАМИКИ СПЕКТРА ГЕОРАДАРНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ГЛУБОКОМ ЗОНДИРОВАНИИ

Аннотация. Распространение электромагнитных импульсов в геологических средах сопряжено с высоким поглощением энергии и частотной дисперсией, что можно наблюдать не только во временной области, традиционно демонстрируемой в результатах георадарных исследований, но и в частотной. Исследование эволюции амплитудно-частотных характеристик проведено на данных глубокого георадарного зондирования в зоне распространения многолетнемёрзлых пород. Масштабы полевых работ обеспечили репрезентативный по объему и качеству материал для рассмотрения основных закономерностей динамики спектра полезного сигнала с глубиной: затухание, смещение амплитуды в область низких частот; сужение ширины спектра, рост спектральных компонент в низкочастотной области. В работе приведены спектральные характеристики, полученные при расстоянии между точками приема и передачи от 100 до 300 м и временном окне анализа от 0 до 3150 нс.
Ключевые слова: спектральный анализ, георадар, глубинное зондирование.
Для цитирования: Гулевич О. А., Волкомирская Л. Б., Резников А. Е. Основные закономерности динамики спектра георадарных сигналов при глубоком зондировании // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

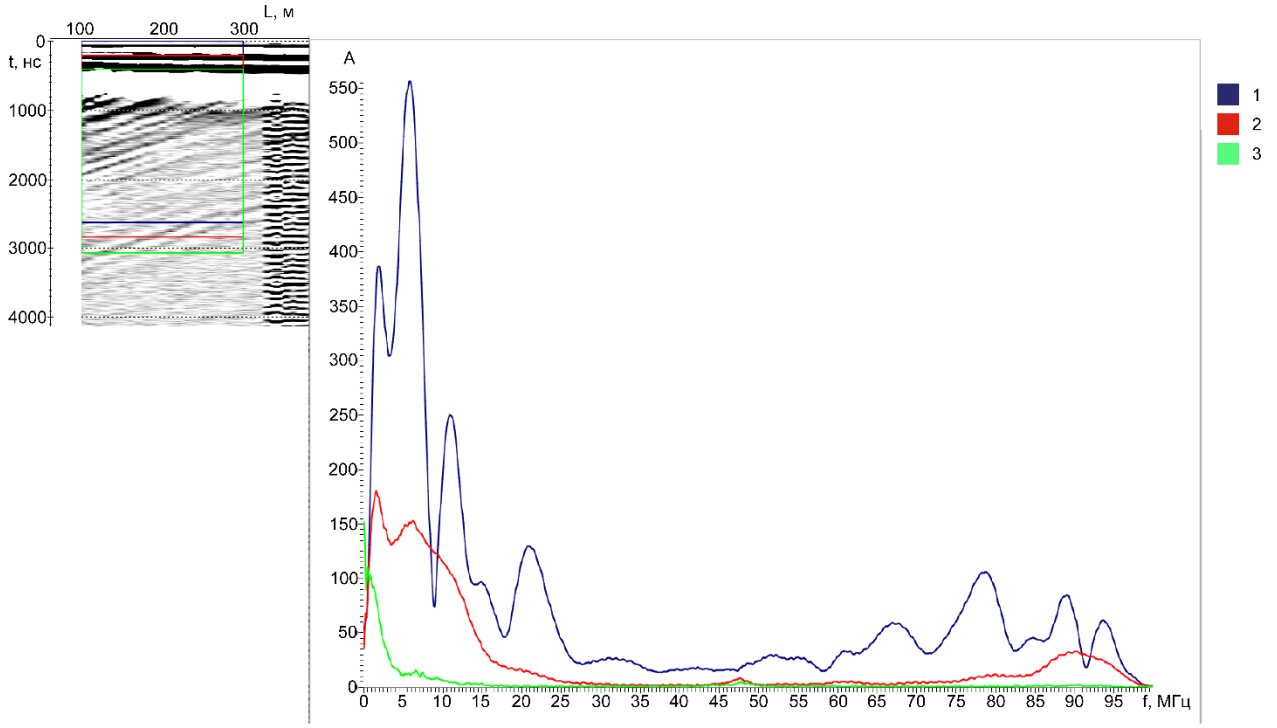
O. A. Gulevich[1,2], L. B. Volkomirskaya[1], A. E. Reznikov[1]
[1]Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Russian Federation
[2]Timer LLC, Moscow, Russian Federation

KEY REGULARITIES OF GROUND-PENETRATING RADAR SIGNAL SPECTRUM DYNAMICS IN DEEP SOUNDING

Abstract. The propagation of electromagnetic pulses in geological media involves high energy absorption and frequency dispersion. These phenomena can be observed not only in the time domain, traditionally displayed in ground-penetrating radar (GPR) survey results, but also in the frequency domain. The evolution of amplitude-frequency characteristics was studied using deep GPR sounding data collected in a permafrost zone. The scale of the fieldwork provided a representative volume of high-quality data to analyze the main patterns of useful signal spectrum dynamics with depth: attenuation, amplitude shift toward lower frequencies, spectrum narrowing, and the growth of spectral components in the low-frequency range. This paper presents spectral characteristics obtained with transmitter-receiver separation distances ranging from 100 to 300 m and a time analysis window from 0 to 3150 ns.
Keywords: spectral analysis, ground-penetrating radar, GPR, deep sounding.
For citation: Gulevich O. A., Volkomirskaya L. B., Reznikov A. E. Key regularities of ground-penetrating radar signal spectrum dynamics in deep sounding // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Обработка и интерпретация результатов георадиолокационных исследований является одной из основных проблем, тормозящих широкое внедрение георадиолокации. Эффективность обработки георадарных профилей можно существенно повысить за счет спектральных методов, однако в реальной практике георадиолокации они используются гораздо реже, чем в сейсморазведочных работах. Одним из препятствий на пути развития алгоритмов обработки в спектральной области является быстрое затухание георадарных сигналов, которое уже в приповерхностном слое может значительно исказить спектральную кривую, не давая возможности рассмотреть динамику ее изменения.

В ходе полевых работ с экспериментальной георадарной аппаратурой на территории Надымского района, ЯНАО, были получены данные с разносом передатчика и приемника на расстояниях от 100 до 750 м и длительностью регистраций до 10 мкс в благоприятных для георадарного зондирования условиях мерзлых пород. Спектральный анализ произведен на полевых данных, полученных с использованием передатчика повышенной мощности с пиковой амплитудой импульса не менее 48 кВ, приемника ГРОТ 12 с длительностью записи до 10 мкс с шагом 5 нс и резистивно-нагруженных антенн с центральной частотой 3 МГц (по паре четвертьволновых электрических диполей длиной 25 м на блоки приемника и передатчика). Начало регистрации сигнала смещено по времени и запускается в момент беспроводной синхронизации приемника с передатчиком по воздушной волне, из-за чего полевые данные при съемке методом с общей глубинной точкой имеют непривычный «развернутый» вид (см. рисунок). Исходя из параметров съемки границы корректного воспроизведения спектра от 100 кГц до 100 МГц (частота Найквиста). На практике, для обработки обычно применяется значительно более узкие полосовые фильтры, однако здесь, для наглядности, представлены данные после полосовой фильтрации (Simple Bandpass Filter 0-0-90-99) с линейной аппроксимацией на верхнем скате частотного окна.



Фрагмент радарограммы и спектры с разных глубин в абсолютных (истинных) амплитудах при расстояниях разноса приемник-передатчик L 100-300 м.
Размер окна анализа по t: 1 – 0-2650 нс; 2 – 200-2850 нс; 3 – 400-3150 нс

На рисунке представлены фрагмент радарограммы с выделенными окнами анализа и соответствующие им спектры, полученные при смещении окна по шкале временных задержек сигнала. В анализируемой области радарограммы отчетливо выделяются оси синфазности на всех регистрируемых временах задержки сигнала даже без дополнительной обработки, что свидетельствует о высоком качестве полевого материала. В верхней части радарограммы часть сигнала выходит за шкалу регистраций, амплитуды ограничены заданным порогом, что формирует в спектре сигнала характерные лепестки, наиболее выраженные в приповерхностном окне от 0 до 2650 нс.

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением глубины происходит снижение амплитуд полезного сигнала, наиболее интенсивное для высоких частот, при этом спектральная кривая проходит через трансформацию от выпуклой формы с максимумом вблизи центральной частоты к вогнутой с характерным ростом спектральной плотности в нижней граничной области спектра, ниже основного рабочего диапазона георадара. Это эффект дрейфа нулевой линии, который формируется на полевых данных за счет искажения формы электромагнитного импульса при распространении в среде. При этом спектр полезного сигнала сужается. Даже в малоглубинных георадарных исследованиях исходный спектр регистрируемого сигнала может описываться кривой типа 2, если произведение проводимости и характерной длительности сигнала превышает принятую для георадиолокации условную границу благоприятных условий работ, то есть в условиях, когда влиянием дисперсии и проводимости можно пренебречь.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИЗМИРАН (тема № FFUM-2026-0010).

Т. Б. Клименко[1,2], С. А. Варнаков[1,2], А. С. Ященко[2], С. В. Кривальцевич[1,2]
[1]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА МОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СВЯЗИ КВ-ДИАПАЗОНА

Аннотация. Экспериментально исследованы грунты Омской области вблизи Новотроицкого сельского поселения и поселка Ачаир. Получены количественные зависимости удельного сопротивления, комплексной диэлектрической проницаемости, удельной проводимости грунтов, сопротивления заземляющих электродов, необходимых для определения параметров эффективного заземляющего устройства, от количества почвенной влаги. Показано влияние количества почвенной влаги на выбор необходимого числа заземляющих электродов.
Ключевые слова*:* высокочастотные помехи, электромагнитная совместимость, заземление, мобильные комплексы связи, удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость, почвенная влага.
Для цитирования*:* Клименко Т. Б., Варнаков С. А., Ященко А. С., Кривальцевич С. В. Влияние почвенной влаги на эффективность заземляющего устройства мобильного комплекса связи КВ-диапазона // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

T. B. Klimenko[1,2], S. A. Varnakov[1,2], A. S. Yashchenko[2], S. V. Krivaltsevich[1,2]
[1]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

INFLUENCE OF SOIL MOISTURE ON THE EFFICIENCY OF THE GROUNDING OF MOBILE HF COMMUNICATION COMPLEXES

Abstract. The report considers the soils in the Omsk region near the Novotroitskoye rural settlement and the village of Achair. The experiment demonstrates quantitative relationships between the soil resistivity, complex permittivity, specific conductivity, as well as grounding electrode resistance, and the amount of soil moisture. The amount of soil moisture affects the required number of grounding electrodes.
Keywords*:* high-frequency interference, electromagnetic compatibility, grounding, mobile HF communication complexes, resistivity, permittivity, soil moisture.
For citation*:* Klimenko T. B. Varnakov S. A., Yashchenko A. S., Krivaltsevich S. V. Influence of soil moisture on the efficiency of the grounding of mobile HF communication complexes // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В работе рассматривается роль почвенной влаги при проектировании эффективного заземляющего устройства для коротковолнового мобильного комплекса. Под эффективностью заземляющего устройства понимается выполнение заземляющим

устройством задач электромагнитной совместимости – снижение высокочастотных помех за счет отведения помех в грунт и улучшение электромагнитной обстановки в целом при одновременном выполнении обеспечения электробезопасности для операторов аппаратуры. При проектировании эффективного заземляющего устройства становится актуальным определение параметров его элементов исходя из совокупности данных свойств среды (грунта), в которой элементы заземляющего устройства будут выполнять поставленные перед ним задачи.

Свойства грунта, определяющие выбор параметров элементов заземляющего устройства, – это условия среды (температура, увлажненность почвы, глубина промерзания, наличие грунтовых вод), электрофизические свойства, гранулометрический и минеральный состав грунта.

Атмосферные осадки, конденсация тумана и росы, грунтовые воды наполняют грунт влагой. Равномерность распределения влаги зависит от пористости геолого-минеральных пород и характера их послойной равномерности, а также от свойств самой воды. Известно, что с увеличением пористости грунта удельная проводимость возрастает, а удельное сопротивление падает. Особенность строения молекулы и свойства воды определяют интенсивность послойного увлажнения. Нахождение влаги разных форм в многослойной структуре грунта создает возможность протекания в ней тока. Известно, что перенос ионов солей такими формами влаги, как жидкой свободной и слабосвязанной, создают движение тока. Таким образом распределение почвенной влаги в грунте довольно сложный процесс, зависящий от множества факторов.

Цель исследования – заключается в установлении качественной и количественной роли воздействия почвенной влаги в грунтах Омской области на эффективность заземляющего устройства и на определение параметров его элементов.

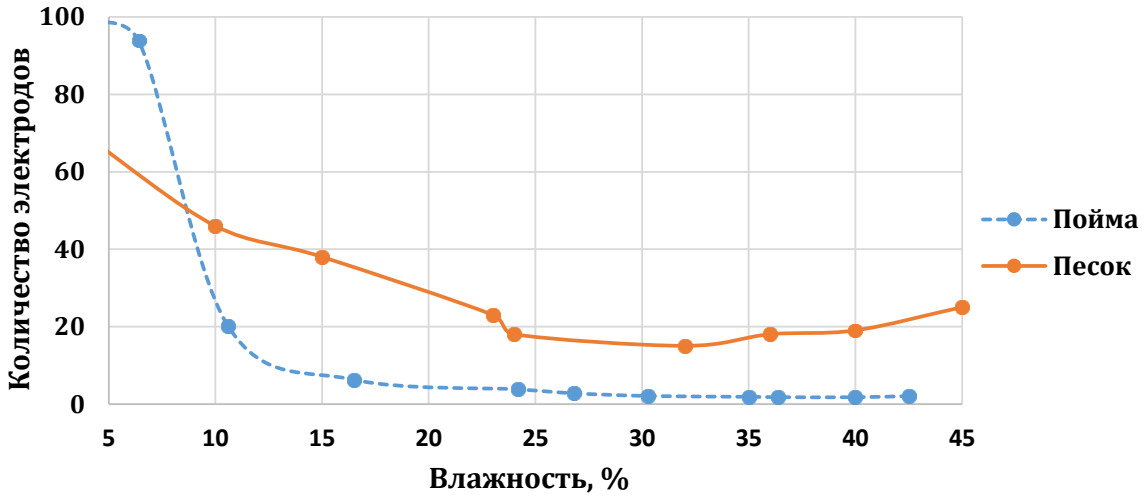
В работе исследованы грунты Омской области разные по составу и свойствам, образцы которых отобраны в пойме р. Иртыш недалеко от Новотроицкого сельского поселения и песчаном карьере вблизи поселка Ачаир.

Песчаный грунт рассматривался как однородный грунт, пойменный грунт рассматривался как неоднородный состоящий из трех слоев геолого-минеральных пород. Исследования свойств грунтов проводили в лабораторных условиях с использованием векторного анализатора цепей и восстановления электрических параметров из полученных S-параметров. Влажность грунтов определена термостатно-весовым методом.

При моделировании характеристик заземляющих электродов применялся типовой заземлитель мобильного комплекса с геометрическими размерами: длинной 1,5 м и диаметром 16 мм. В работе применено допущение, что влага, высушенная из образцов грунта, условно вся участвует в растекании тока. В работе не учитывалось послойное естественное изменение влажности грунтов. При моделировании электрофизических характеристик учтены: значение допустимого сопротивления заземляющего устройства растеканию тока, коэффициенты использования заземлителей, коэффициент сезонности для Омской области, особенность распространения электромагнитных помех в коротковолновом диапазоне за счет рассмотрения характеристик линии передачи.

На рисунке представлена зависимость количества заземляющих электродов, которое необходимо выбрать для построения эффективного заземляющего устройства при определенном значении объемной влажности грунтов. Зависимости показывают, что при влажности более 8,5 % для построения заземляющего устройства на пойменном грунте, в отличие от песчаного, необходимо значительно меньше заземляющих электродов, т.к. он более пористый, и способен удерживать большее количество почвенной влаги, тем самым способствуя протеканию тока в грунте. Как показано на графике при влажности грунтов менее 8,5 % для размещения на песчаном грунте необходимо 67 заземляющих электродов, а на песчаном 93. Данный результат можно объяснить, недостаточностью данных об изменении влажности по глубине неоднородного пойменного

грунта. Нижний слой, в отличие от верхних, обладает большим значением удельного сопротивления при влажности менее 8,5 %, поэтому при естественном распределении почвенной влаги нижний слой будет более увлажнен и удельное сопротивление снизится, приводя к уменьшению необходимого количества заземляющих электродов. Кроме того, известны работы, в которых было использовано влияние почвенной влаги на электрические параметры почвы и намеренно проводилось увлажнение грунта для снижения его удельного сопротивления и сопротивления электродов растеканию тока.



Выбор необходимого числа заземляющих электродов в зависимости от количества почвенной влаги для размещения на территории вблизи Новотроицкого поселения (пойма) и поселка Ачаир (песок)

В результате проведенных исследований подтверждено влияние почвенной влаги на значения электрических параметров грунта, показано влияние почвенной влаги на изменение сопротивлений заземляющих электродов и выбора их количества, обоснована необходимость послойного учета параметров влажности при проектировании эффективного заземляющего устройства. Получены для различных частот коротковолнового диапазона количественные зависимости параметров действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости, удельных проводимости и сопротивления грунтов Омской области вблизи поселка Ачаир и Новотроицкого поселения, сопротивления заземляющих электродов от количества почвенной влаги. По полученным данным, в зависимости от значений объемной влажности грунтов для построения эффективного в обеспечении электромагнитной совместимости заземляющего устройства на пойменной территории р. Иртыш необходимо от 2 до 94 заземляющих электродов, а на территории песчаного карьера необходимо от 25 до 67 заземляющих электродов.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Ю. А. Костычов[1], О. В. Родионова[2], А. В. Репин[2]
[1]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация
[2]Омский государственный педагогический университет, Омск, Российская Федерация

РЕЗОНАНСНЫЙ МИКРОПОЛОСКОВЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЧВЫ

Аннотация. Представлена конструкция датчика на основе щелевого резонатора для неразрушающего контроля диэлектрических свойств почвы. Измерения диэлектрической проницаемости почвы датчиком проводят на длине волны, равной удвоенной электрической длине щелевого резонатора. Физическая длина щели резонатора 37 мм, ширина 0,5 мм. Конструкция датчика позволяет выполнять измерения почвы прикладыванием резонатора к ее поверхности. Диапазон частот проведения измерений 1–2,5 ГГц, конкретная частота измерений обусловлена влажностью почвы и содержанием в ней глины и минералов.
Ключевые слова: диэлектрические измерения, микрополосковая линия, щелевой резонатор, калибровочные жидкости, почвы.
Для цитирования: Костычов Ю. А., Родионова О. В., Репин А. В. Резонансный микрополосковый датчик для неразрушающего измерения диэлектрической проницаемости почвы // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

Yu. A. Kostychov[1], O. V. Rodionova[2], A. V. Repin[2]
[1]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation
[2]Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russian Federation

RESONANT MICROSTRIP SENSOR FOR NON-DESTRUCTIVE PERMITTIVITY MEASUREMENTS OF SOIL

Abstract. The report presents the sensor design based on a slot resonator for the non-destructive dielectric permittivity measurements of soil. Measurements using the sensor are performed at a wavelength equal to twice the electrical length of the slot resonator. The physical dimensions of the resonator slot are selected as 37 mm in length and 0,5 mm in width. The sensor design allows for soil measurements to be taken by placing the resonator against the soil surface. The measurement frequency range of the sensor extends from 1 GHz to 2,5 GHz, the specific measurement frequency is determined by the soil moisture and its clay and mineral composition.
Keywords: dielectric measurements, microstrip line, slot resonator, calibration fluids, soils.
For citation: Kostychov Yu. A., Rodionova O. V., Repin A. V. Resonant microstrip sensor for non-destructive permittivity measurements of soil // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Известно, что резонансные методы измерения диэлектрической проницаемости отличаются от широкополосных большей точностью, а также вычислительной простотой. Использование для резонансных измерений коаксиальных полуволновых резонаторов получило широкое распространение из-за высокой собственной добротности по-

следних. Подобные резонаторы используют чаще всего в режиме слабой связи с нагрузкой, когда собственная добротность оказывается меньше внешней, для повышения точности измерений.

Недостатками таких резонаторов, полностью заполняемых исследуемым материалом, являются необходимость забора почвы с нарушением ее естественного сложения и возможность измерений только сухих почв. Последнее обусловлено тем, что при полном заполнении объема резонатора влажной почвой добротность его оказывается сниженной настолько, что при подключении его к векторному анализатору цепей резонанс не может быть обнаружен (из-за большой величины вносимых потерь измеряемого материала – почвы).

Эффект сниженной добротности резонатора при заполнении его влажной почвой может быть нивелирован частичным заполнением объема резонатора. В этом случае на характеристики действует так называемое эффективное (или действующее) значение диэлектрической проницаемости почвы (что также относится и к вносимым потерям). Эффективное значение диэлектрической проницаемости оказывается сниженным (сниженными оказываются и вносимые потери) поскольку резонатор заполняет комбинация измеряемой почвы, воздуха и конструктивных диэлектрических разделителей, обеспечивающих частичное заполнение.

Очевидно, что описанный вариант резонансного измерения диэлектрической проницаемости почвы с помощью частично заполненного резонатора перестает удовлетворять требованиям простоты конструкции.

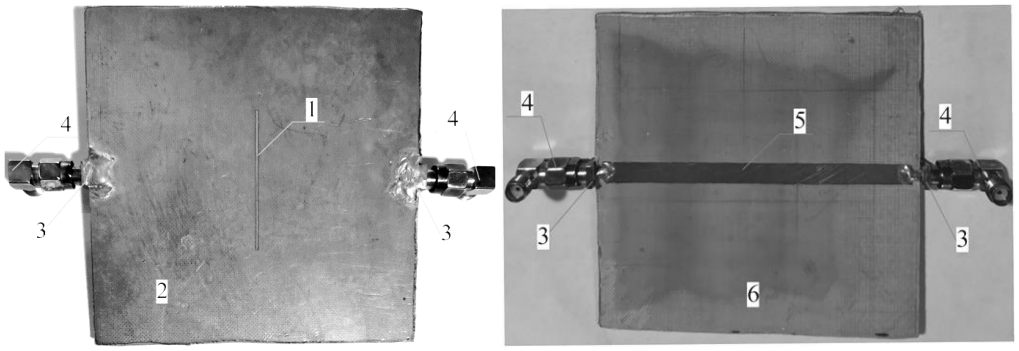
Применение представленного в настоящем докладе датчика диэлектрической проницаемости на основе щелевого полуволнового заграждающего резонатора микрополоскового исполнения позволит не только измерять диэлектрическую проницаемость влажных почв, но и делать это без нарушения структуры почвы путем прикладывания к ней датчика при сохранении простоты конструкции последнего.

Исследуемый датчик (внешний вид макета приведен на рис. 1) представляет собой микрополосковую линию с полоской шириной 5,8 мм, размещенной на одной стороне диэлектрической подложки из материала ФАФ-4Д (используется из-за малых вносимых потерь) толщиной 2 мм. На другой стороне подложки размещен заземленный экран, с нарушенной металлизацией в виде щели, являющейся намеренным дефектом в экране микрополосковой линии. Щелевой полуволновый резонатор (щель) электромагнитно связан с нагрузкой посредством полоски линии. На концах микрополосковой линии распаяны СВЧ разъемы (типа SMA-гнездо), с присоединенными угловыми переходами для удобства подключения коаксиальных кабелей векторного анализатора цепей. Длина линии составляет 90 мм, прямоугольная щель резонатора имеет длину 37 мм и ширину 0,5 мм. Щель расположена по центру датчика перпендикулярно полоске линии.

При измерении диэлектрической проницаемости почвы датчик плотно прикладывали к ее поверхности нижней стороной (с заземленным экраном). Электрическая длина резонатора была определена действующим на него значением диэлектрической проницаемости почвы. При равенстве электрической длины щели половине длины волны, на которой проведено измерение, фиксируемый с помощью векторного анализатора модуль коэффициента передачи датчика оказывался минимальным (вносимое затухание заграждающего резонатора принимало максимальное значение). Квадрат отношения измеренной электрической длины щели к ее известной физической длине приравнивался эффективному значению диэлектрической проницаемости ($\varepsilon'_{эфф}$).

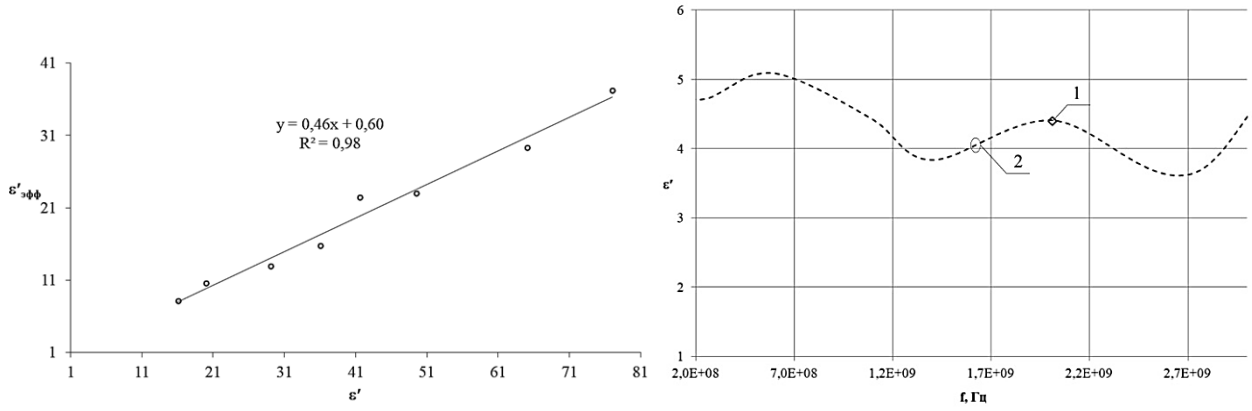
Для восстановления значения диэлектрической проницаемости почвы ε' по ее эффективному значению $\varepsilon'_{эфф}$ были составлены регрессионные уравнения. Для получения регрессионных уравнений производилась калибровка датчика. Для этого датчик прикладывали к жидкостям с известными значениями диэлектрической проницаемости ε'. Использовались водные растворы технического ацетона (с процентной объемной долей

дистиллированной воды 0, 7, 16, 24, 33, 41, 50, 67 и 100%, в последнем случае была использована чистая дистиллированная вода). Диэлектрическая проницаемость растворов контролировалась методом широкополосной емкостной спектроскопии и определялась аналитически как сумма статических значений диэлектрических проницаемостей ацетона и воды, взятых в процентном соотношении. На рис. 2*а* приведена зависимость значений диэлектрической проницаемости раствора от ее действующих значений, также показано регрессионное уравнение и его графическое представление.



а ***б***

Рис. 1. *Вид датчика снизу (а) и сверху (б):*
1 – щель, 2 –экран, 3 – припаянный СВЧ-разъем, 4 –переход, 5 – полоска, 6 – подложка



а ***б***

Рис. 2. *Результаты экспериментального исследования датчика: а) регрессионная зависимость* $\varepsilon'_{эфф}$ *от* ε'*; б) результаты измерения диэлектрической проницаемости почвы* ε' *с помощью исследуемого резонансного датчика (1) и с помощью широкополосной ячейки (2)*

На рис. 2*б* приведены результаты измерения диэлектрической проницаемости почвы объемной влажностью 24% с содержанием глины 41% (по массе) и с содержанием гумуса 4,7% как с помощью исследуемого резонансного датчика, так и с помощью широкополосной ячейки на основе отрезка микрополосковой линии, описанной в докладе этого сборника.

Анализ результатов измерений показал, что для почвы влажностью 24% резонанс приходился на частоту 2,01 ГГц, а значение диэлектрической проницаемости почвы составило ε'=4,413 при этом эффективное значение $\varepsilon'_{эфф}$=2,63, а результат широкополосного измерения с помощью ячейки на этой частоте составил ε'=4,407.

Таким образом, результаты измерений с помощью широкополосного метода и исследуемого резонансного отличались во втором знаке после запятой, что позволило считать измерения достоверными.

Недостатком проведенного исследования является невысокий коэффициент детерминации полученного регрессионного уравнения. Для улучшения точности измерений запланировано измерение дополнительных калибровочных жидкостей.

Полученные результаты показывают возможность использования микрополоскового датчика на базе щелевого запирающего резонатора для неразрушающего измерения диэлектрических характеристик почв естественной влажности.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Ю. А. Костычов, К. А. Майненгер, А. В. Бучельников, Н. Е. Агарков
С. В. Кривальцевич, С. А. Варнаков, А. С. Ященко
Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЧВЫ НА ПРИЗЕМНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости действующих значений диэлектрической проницаемости почвы на приземные пластинчатые излучатели в декаметровом диапазоне длин волн от ее свойств. Представлены экспериментально полученные регрессионные формулы действующих значений действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и проводимости подстилающей поверхности на пластинчатые излучатели в виде секторов с углом при вершине от 60 до 140 градусов. Проведена апробация регрессионной модели в натурных условиях на почве в диапазоне частот от 5 до 45 МГц.
Ключевые слова*:* диэлектрические измерения, эффективные значения, действующие значения, антенна, почвы.
Для цитирования*:* Костычов Ю. А., Майненгер К. А., Бучельников А. В., Агарков Н. Е. Кривальцевич С. В., Варнаков С. А., Ященко А. С**.** Экспериментальное исследование действующего значения комплексной диэлектрической проницаемости почвы на приземные излучатели// Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

Yu. A. Kostychov , K. A. Maynenger, A. V. Buchelnikov, N. E. Agarkov
S. V. Krivaltsevich, S. A. Varnakov, A. S. Yashchenko
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

EXPERIMENTAL STUDY OF EFFECTIVE DIELECTRIC PERMITTIVITY OF THE ANTENNA UNDERLYING SURFACE

Abstract. The report presents the results of experimental studies of the soil effective dielectric permittivity values. Experimentally derived regression formulas are presented for the effective values of the dielectric permittivity and the conductivity of soil, specifically for sector-shaped plate radiators with vertex angles ranging from 60 to 140 degrees. The regression model was validated within the 5–45 MHz frequency band.
Keywords*:* dielectric measurements, effective values, actual values, antenna, soils.
For citation*:* Kostychov Yu. A., Maynenger K. A., Buchelnikov A. V., Agarkov N. E., Krivaltsevich S. V. , Varnakov S. A., Yashchenko A. S. Experimental study of effective dielectric permittivity of the antenna underlying surface // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Распространенным подходом при аналитическом описании электромагнитной модели приземных антенн (излучатели которых расположена на границе «почва-воздух») является допущение, что действующее значение диэлектрической проницаемости почвы ($\varepsilon'_{эфф}$), влияющее на электрические характеристики антенны, представляет собой

среднее арифметическое между диэлектрической проницаемостью воздуха (ε′=1) и диэлектрической проницаемостью самой почвы. Этот подход имеет недостатки, он не учитывает тип и конструкцию антенны. Поэтому возникает необходимость в установлении более точных зависимостей для значений диэлектрической проницаемости и проводимости почвы действующих на приземную антенну. Настоящий доклад представляет результаты экспериментального получения регрессионных формул, связывающих диэлектрическую проницаемость и проводимость подстилающей поверхности с их действующими на антенну значениями. В докладе рассмотрено три варианта пластинчатых антенн секторного типа (рис. 1*а*) с углом при вершине сектора 2α в 60°, 100° и 140°, вариация угла α позволила оценить влияние геометрии антенны на ее взаимодействие с почвой. Длина плеча l равна 0,5 метра, угол между осями секторов излучателей антенны β равен 90°.

Измерение действующих на антенну значений диэлектрической проницаемости и проводимости было выполнено с помощью методов широкополосной емкостной спектроскопии. Для этого была построена эквивалентная схема антенны на сосредоточенных элементах (рис. 1*б*): L – индуктивность излучателя, g – активная проводимость, C – емкость излучателя, Ск – контактная емкость. Диэлектрическая проницаемость и проводимость подстилающей поверхности была измерена аналогичным методом с помощью емкостной ячейки на базе симметричной полосковой линии.

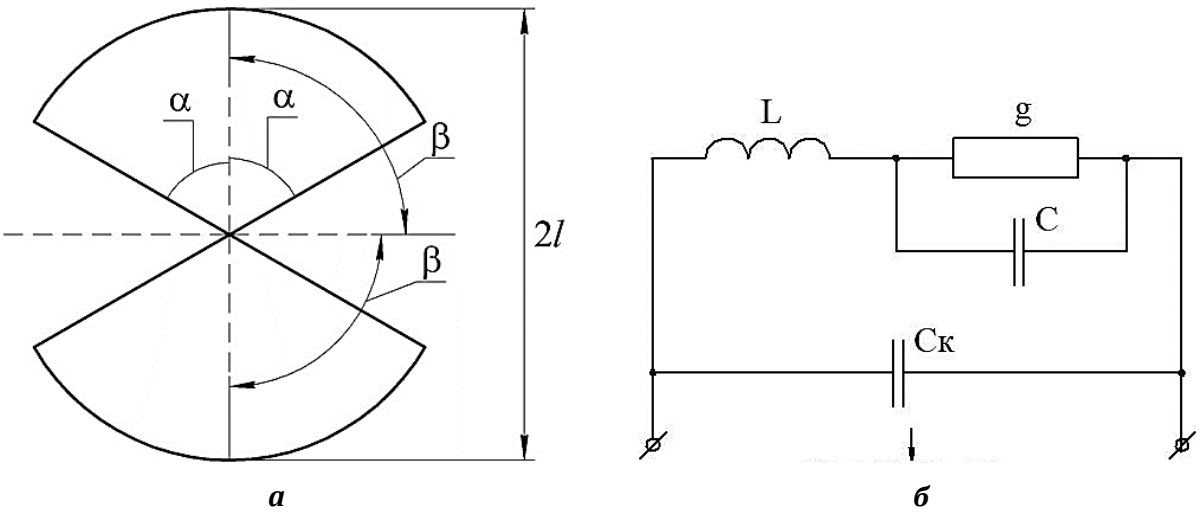
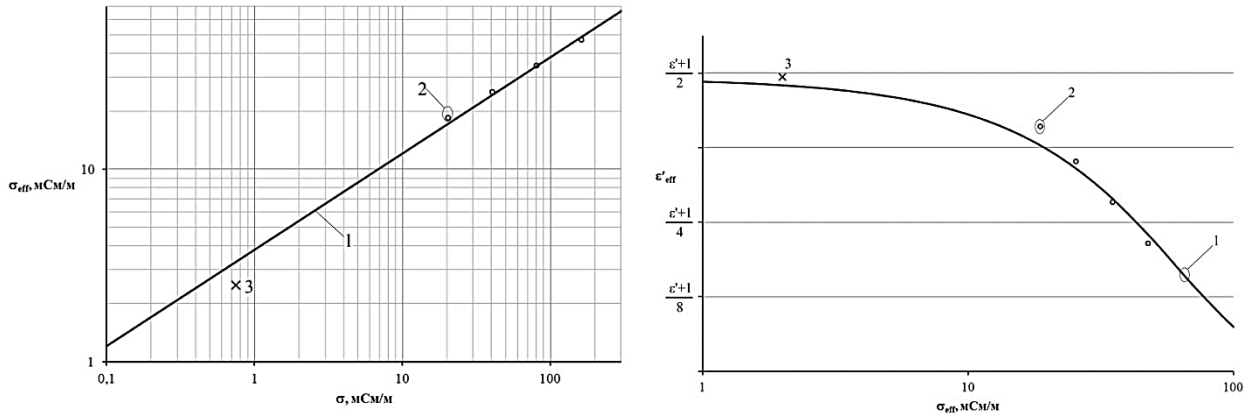


Рис. 1. *Вид приземной пластинчатой антенны (а) и ее эквивалентная схема (б)*

Для установления зависимости действующих значений от значений проводимости и диэлектрической проницаемости были проведены измерения характеристик антенны, расположенной на средах с известными диэлектрическими характеристиками (сухой речной песок и водные растворы соли NaCl проводимости 20, 40, 80 и 160 мСм/м).

Было установлено, что действующее значение диэлектрической проницаемости нелинейно зависит от параметров грунта и практически не меняется с изменением угла при вершине сектора пластинчатого излучателя (рис. 1*а*, *б*). Полученные эмпирические зависимости имеют коэффициент детерминации выше 0,99 для широкого диапазона проводимостей.



а *б*

Рис. 2. *Графики уравнений регрессии для действующих значений: удельной проводимости (а) и действительной части диэлектрической проницаемости (б). Нумерация графиков соответствует: 1 – формуле регрессионного уравнения, 2 – измеренным усредненным значениям для антенны, размещенной на водном растворе NaCl, 3 – измеренному значению для антенны, размещенной на речном песке*

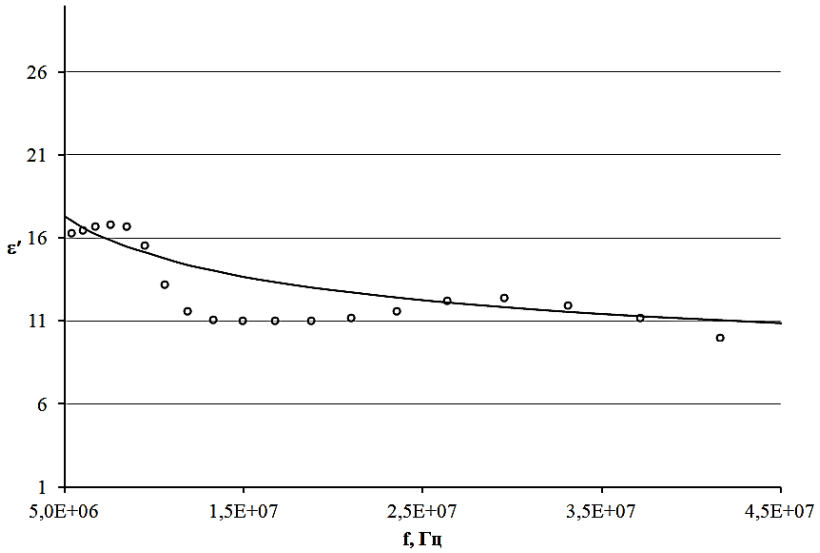


Рис. 3. *Полученные при апробации на почве регрессионной модели графики зависимости значений действительной части диэлектрической проницаемости: сплошная линия – прямо измеренные значения диэлектрической проницаемости поверхностного слоя почвы, круглые маркеры – результат восстановления диэлектрической проницаемости почвы с помощью полученной регрессионной модели*

Апробация модели в натурных условиях подтвердила возможность использования данного подхода. Восстановленные значения диэлектрической проницаемости по регрессионной модели имели относительное отклонение не более 20% от прямо измеренных характеристик верхнего слоя почвы.

Выявлена необходимость дальнейшего уточнения модели для сред с удельной проводимостью в диапазоне 1–20 мСм/м. Результаты работы имеют практическую значимость для проектирования эффективных антенных систем КВ-диапазона, а также для развития методов электроразведки и дистанционного зондирования почвы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Омской области в рамках гранта РНФ № 26-12-20019.

В. П. Крылов, Р. А. Чирков
ГНЦ, АО «ОНПП «Технология» им А.Г. Ромашина», Обнинск, Российская Федерация

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИ ПАДЕНИИ ВОЛНЫ ПОД УГЛОМ БРЮСТЕРА

***Аннотация*.** Рассматривается экспериментальная реализация широкополосного метода определения частотной зависимости диэлектрической проницаемости материалов в свободном пространстве на бистатической установке при измерении отраженной волны вблизи угла Брюстера. Допущения, принимаемые в оптике, позволяют не учитывать зависимость от толщины исследуемого образца. Но в эксперименте на сверхвысоких частотах эти зависимости наблюдаются, что снижает точность определения диэлектрической проницаемости. Высокой потенциальной точности широкополосного метода определения частотной зависимости диэлектрической проницаемости материала по формуле Брюстера можно достичь, проводя измерения с использованием векторного анализатора цепей, позволяющего применить селекцию отражения только от первой границы пластины во временной области.
***Ключевые слова**:* относительная диэлектрическая проницаемость, методы измерения в широкой полосе частот, пластины материалов, методы измерения в свободном пространстве, угол Брюстера, применение временной селекции.
***Для цитирования**: Крылов В. П., Чирков Р. А.* Широкополосный метод определения частотной зависимости диэлектрической проницаемости материала в свободном пространстве при падении волны под углом Брюстера // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества: тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия) Омск : ОННИП, 2026.

V. P. Krylov, R. A. Chirkov
JSC “Obninsk Research and Production Enterprise “Technology” named after A. G. Romashin”
Obninsk, Russian Federation

BROADBAND METHOD FOR DETERMINING THE FREQUENCY DEPENDENCE OF DIELECTRIC PERMITTIVITY OF MATERIAL IN FREE SPACE AT THE BREWSTER ANGLE OF INCIDENCE

Abstract. This paper discusses implementing a broadband free-space technique to measure materials’ frequency-dependent permittivity, using a bistatic setup that records the reflected wave near the Brewster angle. Although optical approximations neglect sample thickness effects, these dependence become noticeable in microwave experiments and reduce permittivity retrieval accuracy. The broadband Brewster-angle method can achieve high potential accuracy by employing a vector network analyzer; its time-domain capability isolates the front-face reflection alone.
Keywords: relative permittivity, wideband measurement methods, material plates, free-space measurement methods, Brewster angle, time-domain gating.
***For citation**:* Krylov V. P., Chirkov R. A. Broadband method for determining the frequency dependence of dielectric permittivity of material in free space at the Brewster angle of incidence // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Метод определения частотной зависимости диэлектрической проницаемости (ε(f)), основанный на измерении отраженной волны при наклонном падении волны на пластину под углом Брюстера при теоретическом описании обладает высокой потенциальной точностью, так как определение диэлектрической проницаемости предполагает отсутствие зависимости от толщины исследуемого образца:

$$\varepsilon = \mathrm{tg}^2(\alpha_{\text{Бр}}), \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала без потерь, $\alpha_{\text{Бр}}$ – угол падения волны на пластину, угол Брюстера.

При экспериментальных измерениях на сверхвысоких частотах было установлено, что, кроме эффекта, определяемого зависимостью (1), наблюдаются эффекты, связанные с электрической толщиной пластины. Разрешить эту проблему можно, используя известный в оптике принцип поиска наилучшего изображения объекта, используя максимально тонкий слой материала или исключением влияния второй границы раздела сред при использовании сильного поглощения в материале.

В представленной работе реализуется метод, позволяющий устранить влияние второй границы за счет дополнительной обработки частотной зависимости отражения во временной области. Результаты измерения угловых зависимостей амплитуды коэффициента отражения от пластины во временной области указывают на отражения от обеих границ пластины и подтверждают, что одним из приемов, повышающих точность определения ε(f), является применение временной селекции, то есть рассмотрение АФЧХ только первой границы пластины.

Для выявления теоретических предпосылок метода представим алгоритм расчета обратного преобразования Фурье от частотного спектра волны, отраженной под углом от пластины, в виде временной зависимости $S(t)$:

$$S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} r(f_i, \beta) \cdot e^{i2\pi f_i t} \cdot df_i, \quad (2)$$

где: $r(f_i, \beta)$ – частотный спектр комплексного коэффициента отраженной волны на частоте для угла α, $\beta = \frac{2\cdot\pi}{\lambda_i} \cdot \sqrt{\varepsilon_2} \cdot d \cdot \cos\alpha$ –параметр, соответствующий n слою; d –геометрическая толщина пластины; ε_2–относительная диэлектрическая проницаемость материала пластины; $\lambda_i = \frac{C}{f_i}$ – длина волны на частоте f_i; с – скорость света; α – угол падения волны на пластину;

Временная зависимость (2) представляется интегралом ОПФ от константы и, по определению ПФ, является дельта-функцией Дирака ($\delta(t)$):

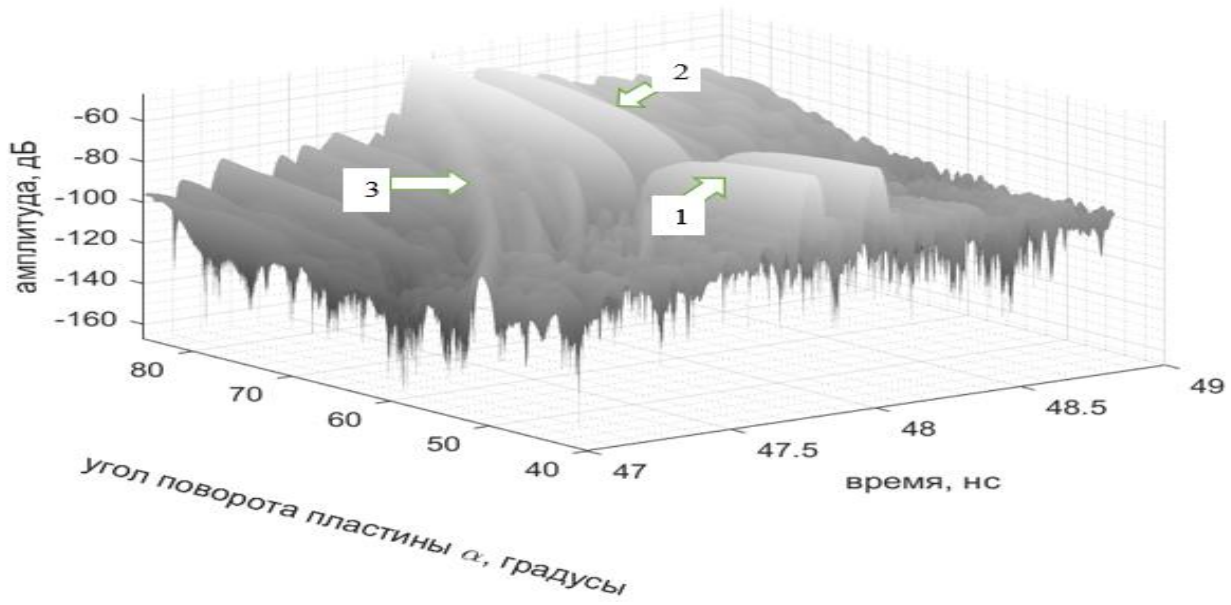
$$S(t) = |r_{12}| \cdot \delta(t) + \sum_{n=1}^{N} (R)^{n-1} \cdot (|r_{12}| \cdot R - |r_{23}| \cdot \delta(t + nT_0)), \quad (3)$$

где $T_0 = \frac{2\cdot\pi}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon_2} \cdot d \cdot \cos\alpha$, при условии $R = |r_{12}| \cdot |r_{23}| < 1$; r_{12} – индексы 1 и 2, соответствующие первой границе пластины, 1 – воздушная среда с $\varepsilon_1 = 1$, а индекс 2, соответствующий пластине с проницаемостью ε_2 , $\varepsilon_3 = 1$.

$S(t)$ описывает временную структуру отраженной волны состоящую из последовательности импульсов с периодом T_0 где самый первый отраженный импульс соответствует отражению от первой границы. Поэтому, выбирая бланком область только первого отражения и представляя его как дельта-функцию, наблюдаемую в эксперименте, получаем искомую частотную зависимость.

Из условия нахождения угла Брюстера находится частотная зависимость относительной диэлектрической проницаемости материала пластины $\varepsilon_2(f)$.

Экспериментальные измерения угловых зависимостей проводились на бистатической установке для отраженной волны от пластины в полосе частот от 4 до 50 ГГц с использованием векторного анализатора цепей.



Объемные графики амплитуды коэффициента отраженной волны в области временной селекции при наклонном падении волны на пластину из кварцевого стекла. Стрелками 1 и 2 указаны гребни, соответствующие границам пластины, стрелка 3 указывает на гребень «протекающего сигнала» между антеннами

Для отслеживания границ искажения сигнала на измеряемую амплитуду отраженной волны внутри полигона вблизи пластины проведены измерения угловых зависимостей коэффициента отражения в полосе частот от 4 до 50 ГГц во временной области. Результаты измерения угловых зависимостей амплитуды коэффициента отражения от кварцевой пластины толщиной d = 18,5 мм в диапазоне углов от 45°до 85° и представлены на рисунке, на котором отчетливо видны максимумы коэффициента отражения от обеих границ пластины (отмечены стрелками 1 и 2). Положение максимума коэффициента отражения, как видно из рисунка, соответствует постоянному значению на временной оси, а их величина плавно снижается в области угла Брюстера $\alpha_{\text{Бр кв}} = 62{,}8732°$. В левой части рисунка видно наклонное расположение гребня, отмеченного стрелкой 3, и связанного с прямым просачиванием сигнала из передающего рупора в приемный, величина которого плавно увеличивается с ростом угла поворота приемного рупора.

Заключение

Результаты проведенных экспериментальных измерений на бистатической установке в свободном пространстве показали, что возможно достижение приемлемой для практики точности определения зависимости ε(f) по формуле Брюстера при использовании анализа угловых зависимостей амплитуды отраженной волны с применением временной селекции и выбором в трансформируемом временном интервале отклика амплитуды коэффициента отраженной волны, соответствующего только первой границе пластины. При этом удается устранить влияние помех, связанных с электрической толщиной пластины, обычно снижающих точность проводимых измерений. Устранение помех происходит за счет выбора в Фурье образе отраженной волны от пластины дельта функции, соответствующей первой границе раздела сред в соответствии с принципом поиска наилучшего изображения, используемого в оптике.

Отличительной особенностью предлагаемой измерительной процедуры является то, что диэлектрическая проницаемость определяется для всех выбранных точек внутри частотного диапазона с одинаковой точностью и ограничивается по верхней частоте только используемыми векторными анализаторами цепей.

Ж. Ә. Оңласынов, М. М. Муратова
Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина, Satbayev University,
Алматы, Республика Казахстан

ОЦЕНКА МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА КАРАТОБИНСКОГО РАЙОНА ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ SENTINEL-2 В СРЕДЕ GOOGLE EARTH ENGINE

Аннотация. Работа демонстрирует возможности облачной платформы Google Earth Engine для оперативного мониторинга состояния растительности в условиях засушливых степных экосистем Западного Казахстана с использованием многолетних временных рядов спутниковых данных Sentinel-2. Актуальность исследования заключается в использовании облачной платформы Google Earth Engine для автоматизированной обработки больших объемов спутниковых данных; анализе многолетней динамики растительности на районном уровне; выявлении пространственных особенностей изменения состояния пастбищ. Основные данные: Sentinel-2 (10 м); период: 2018–2025 гг.; летний сезон (июнь – август). Цель исследования: собрать коллекцию снимков Sentinel-2; выполнить фильтрацию облачности; построить сезонные композиты; рассчитать нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI); оценить изменение средних значений индекса по годам; построить карты динамики растительности; выявить участки с положительными и отрицательными изменениями.
Ключевые слова*:* Sentinel-2, облачная платформа, нормализованный разностный вегетационный индекс, данные дистанционного зондирования, карта растительного покрова.
Для цитирования*:* Оңласынов Ж. Ә., Муратова М. М. Оценка многолетней динамики растительного покрова Каратобинского района Западно-Казахстанской области по данным Sentinel-2 в среде Google Earth Engine// Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

Zh. A Onglassynov, M. M. Muratova
Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Geoecology, Satbayev University
Almaty, Kazakhstan

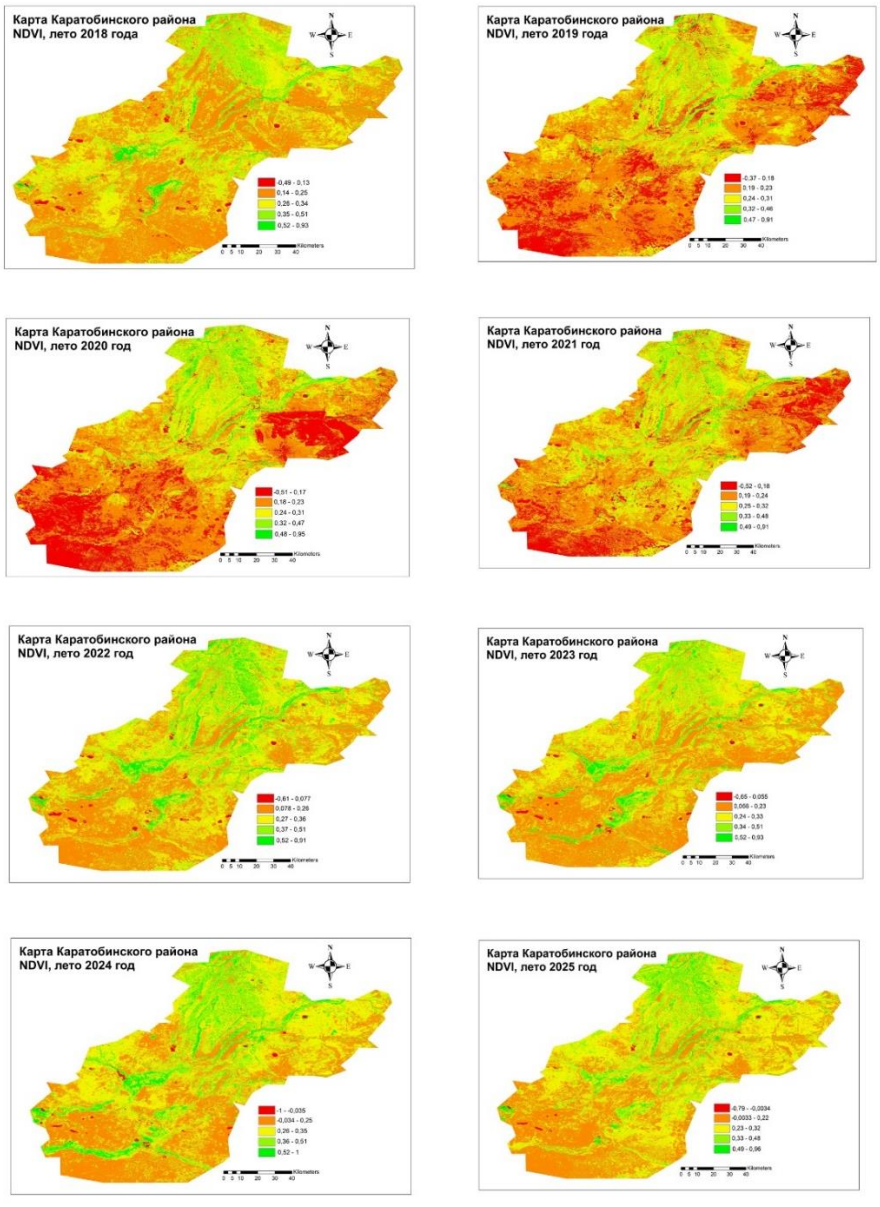
ASSESSMENT OF LONG-TERM DYNAMICS OF VEGETATION COVER IN THE KARATOBIN DISTRICT OF THE WESTERN KAZAKHSTAN REGION BASED ON SENTINEL-2 DATA IN THE GOOGLE EARTH ENGINE ENVIRONMENT

Abstract. The work demonstrates the capabilities of the Google Earth Engine cloud platform for operational monitoring of vegetation condition in arid steppe ecosystems of Western Kazakhstan using long-term time series of Sentinel-2 satellite data. The relevance of the study lies in the use of the Google Earth Engine cloud platform for automated processing of large volumes of satellite data; analysis of long-term vegetation dynamics at the district level; identification of spatial features of changes in pasture condition. Main data: Sentinel-2 (10 m); period: 2018–2025; summer season (June–August). Objective of the study: collect a collection of Sentinel-2 images; filter clouds; construct seasonal composites; calculate the normalized difference vegetation index (NDVI); estimate the change in average index values by year; construct maps of vegetation dynamics; identify areas with positive and negative changes.
Keywords*:* Sentinel-2, cloud platform, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), remote sensing data, vegetation cover map.

***For citation**:* Onglassynov Zh. A., Muratova M. M. Assessment of long-term dynamics of vegetation cover in the Karatobin district of the Western Kazakhstan region based on Sentinel-2 data in the Google Earth Engine environment // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В условиях степной зоны Западного Казахстана изменение растительного покрова определяется межгодовой изменчивостью увлажнения и хозяйственной нагрузкой на пастбищные территории, что может быть выявлено посредством анализа временных рядов NDVI.

Материалами исследования послужили мультиспектральные космические снимки Sentinel-2, полученные в летний период 2018–2025 гг. Обработка данных выполнялась на облачной платформе Google Earth Engine (GEE), которая обеспечивает доступ к архивам спутниковых изображений, автоматизированную предварительную обработку данных и расчет спектральных индексов. В качестве примера использования возможностей платформы был выполнен расчет нормализованного разностного индекса растительности с последующим анализом пространственного распределения растительного покрова на территории Каратобинского района Западно-Казахстанской области.



Пространственное изменение растительного покрова Каратобинского района Западно-Казахстанской области по данным Sentinel-2 за период 2018–2025 гг.

Для этого был написан структурированный код для работы в облачной платформе, который позволил:

- автоматически загрузить снимки Sentinel-2, с разрешением 10 м;
- замаскировать облака на снимках;
- рассчитать вегетационный индекс за указанный период;
- построить сезонные карты;
- экспортировать полученные результаты.

Были получены средние результаты расчетов NDVI: 2018 г. – 0,2696; 2019 г. – 0,2272; 2020 г. – 0,2144; 2021 г. – 0,2426; 2022 г. – 0,2935; 2023 г. – 0,2576; 2024 г. – 0,2886; 2025 г. – 0,2551.

На картах пространственных изменений NDVI (см. рисунок): отрицательные значения – снижение растительности отображены красным цветом; около нуля – стабильное состояние, желтых оттенков; положительные значения зеленого цвета – улучшение растительного покрова.

Заключение

Анализ карты изменения NDVI за период 2018–2025 гг. показывает, что на большей части территории Каратобинского района преобладают участки с незначительными изменениями либо умеренным увеличением значений NDVI, что свидетельствует об относительной стабильности состояния растительного покрова. Участки с положительной динамикой NDVI распределены преимущественно в северной, центральной и отдельных восточных частях исследуемой территории, что указывает на повышение плотности либо активности растительного покрова. Зеленые участки распространены довольно широко.

Использование GEE позволяет работать с многолетними архивами спутниковых снимков без их загрузки на локальный компьютер, значительно сокращает время обработки данных, автоматизирует вычисление спектральных индексов, обеспечивает выполнение анализа на удаленных серверах и упрощает мониторинг изменений природных объектов. Платформа предоставляет доступ к архивам спутниковых снимков таких как Landsat, Sentinel, MODIS, и позволяет выполнять их обработку без необходимости скачивания исходных данных и использования высокопроизводительных локальных вычислительных ресурсов. Благодаря облачным вычислениям значительно сокращается время обработки данных, упрощаются: предварительная обработка изображений; расчет спектральных индексов; проведение пространственного анализа; автоматизация повторяющихся операций с использованием языка JavaScript или Python.

К. В. Немчанов, А. С. Ященко
Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ АКТУАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЗЗ ИЗ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ

Аннотация. Рассмотрена проблема оперативного получения данных дистанционного зондирования Земли. Выполнен анализ трёх типов источников: статических справочников, моделей реанализа и открытых спутниковых каталогов. Показано, что за август 2026 г. ни один из источников не представляет полный набор параметров мониторинга объектов окружающей среды для территории Омской области, а доступ к данным сопряжён с техническими и организационными сложностями. Сформированы рекомендации критического подхода к выбору источников и целесообразности комбинирования данных, полученных с помощью разных технологий дистанционного зондирования Земли, для повышения точности прогноза распространения радиоволн.
Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, подстилающая поверхность, ионосфера, радиотракт.
Для цитирования: Немчанов К. В., Ященко А. С. О возможности получения актуальных данных ДЗЗ из открытых источников // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Российской научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

K. V. Nemchanov, A. S. Yashchenko
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

ON THE POSSIBILITY OF OBTAINING UP-TO-DATE EARTH OBSERVATION DATA FROM OPEN SOURCES

Abstract. The paper considers the problem of operational acquisition of Earth remote sensing data. Three types of sources are analyzed: static reference data, reanalysis models, and open satellite catalogs. It is shown that for August 2026, none of the sources provides a complete set of environmental monitoring parameters for the territory of the Omsk region, and access to data is associated with technical and organizational difficulties. The report recommends a critical approach to source selection and the expediency of combining data obtained through different Earth remote sensing technologies to improve the accuracy of radio wave propagation forecasting.
Keywords*:* Earth remote sensing, underlying surface, ionosphere, radio link.
For citation: Nemchanov K. V., Yashchenko A. S. On the possibility of obtaining up-to-date earth observation data from open sources // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Проектирование современных систем радиосвязи, радиолокации и навигации, в частности тропосферных линий и КВ-каналов с ионосферным отражением, требует априорного знания электродинамических параметров среды. Ключевыми из них являются комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) почвы и электронная концентрация ионосферы. Коэффициент затухания в среде прямо пропорционален мнимой части КДП и определяет глубину проникновения сигнала (скин-слой). Величина этого слоя напрямую задаёт эффективную проводимость подстилающей поверхности, от которой

зависит затухание земной волны при распространении вдоль трассы, а также коэффициент отражения для тропосферных линий. Суточные и сезонные вариации электронной концентрации вносят ошибки в расчёт углов прихода отражённого сигнала, что неприемлемо для высокоточных трасс.

Традиционная практика расчёта радиотрассы опирается на усреднённые справочные данные. Однако в реальных условиях, предполагающих техногенную нагрузку и быструю смену погодных условий, такие таблицы дают значительную погрешность, особенно заметную в межсезонье. В связи с чем возникает необходимость в оперативном получении актуальных данных о состоянии окружающей среды с широким пространственным охватом.

Существующие источники данных о радиофизических параметрах окружающей среды можно разделит на три основные группы. Во-первых, это справочные материалы и архивные карты, которые создаются на основании статистической обработки данных наблюдений. Их достоинством является доступность и нулевые вычислительные затраты. Недостатки: малая дискретность, отсутствие учёта аномальных явлений, непригодность для оперативного частотного планирования. Во-вторых, глобальные модели реанализа (ERA5, MERRA-2), обеспечивающие более высокую временную детализацию и пространственный охват по сравнению со справочными данными, что делает их предпочтительными для приближённых расчётов. Однако их применение затруднено отсутствием открытой информации о физических допущениях, заложенных в параметризации процессов переноса влаги и тепла, а также о методах ассимиляции спутниковых и наземных наблюдений. Константы модели, влияющие на расчёт КДП и влажности, задаются эмпирически и не всегда верифицируются для конкретных типов почв и климатических зон, что вносит дополнительную систематическую погрешность, не поддающуюся прямому учёту.

В-третьих, технологии дистанционного зондирования Земли, обеспечивающие оперативность и глобальный охват, однако получаемые оценки являются вторичным продуктом, рассчитываемым по эмпирическим моделям, калиброванным для ограниченного набора условий. Влияние растительности, снега и минерализации почв приводит к систематическим смещениям, а верификация наземными измерениями охватывает лишь отдельные полигоны. Следовательно, данные ДЗЗ требуют критической оценки применимости для конкретной трассы. Тем не менее, именно этот метод, в отличие от статических справочников и моделей реанализа, позволяет получить пространственно-временную картину состояния на момент расчёта, что делает его наиболее предпочтительным источником при наличии технической возможности доступа к данным.

Для практической реализации задач регионального мониторинга проведён анализ доступности открытых репозиториев спутниковых данных на территории Омской области за период 10–16 августа 2026 года. Наиболее стабильным источником данных по влажности почвы является американская миссия NASA SMAP (SPL3SMP Enhanced L3), предоставляющая данные о влажности верхнего слоя. Доступ к порталу EarthData NSIDC DAAC осуществляется после регистрации. Однако данные о температуре почвы в продуктах SMAP присутствуют лишь частично, а ионосферные параметры отсутствуют вовсе.

В отличие от американского сервиса, европейская программа Copernicus C3S предлагает два канала получения влажности. Научный архив ESA CCI Soil Moisture завершается 2024 годом, что делает его непригодным для получения актуальных данных. Оперативный поток C3S ICDR за август 2026 года доступен через портал Copernicus Climate Data Store после регистрации, однако температура почвы и ионосферные параметры в нём отсутствуют. Для восполнения пробела по температуре был рассмотрен продукт ERA5-Land на том же портале — это единственный источник, одновременно предоставляющий влажность и температуру почвы на нескольких глубинах с почасовым шагом. Данные за 2026 год доступны с задержкой 2–3 месяца, но важно учитывать, что ERA5-

Land является модельным реанализом, а не прямым спутниковым измерением.

Доступ к сервисам с данными отечественных ресурсных спутников отличается ещё большей сложностью. Так, сенсоры космического аппарата «Метеор-М» (МТВЗА): потенциально способны предоставлять данные о влажности, аналогичные SMAP, однако на практике получение данных оказалось наиболее затруднительным. Общедоступный FTP или API отсутствует, распространение осуществляется через ведомственные центры, а получение требует официальных запросов — источник фактически закрыт для оперативного использования.

Заметными преимуществами обладает китайский NSMC (Fengyun) с порталом FENGYUN Satellite Data Service. Это единственный источник из рассмотренных, позволивший получить ионосферные параметры. Регистрация двухэтапная, однако после завершения доступ открывается и позволяет совершать скачивание данных. С портала получены профиль электронной плотности (GNOS) и полное электронное содержание TEC (Tri-IPM) со спутников Fengyun, что критически важно для расчёта рефракции и углов прихода сигнала.

Проведённый обзор показывает, что актуальные данные дистанционного зондирования для целей радиофизического моделирования доступны, однако их получение сопряжено с рядом ограничений. Так, влажность и температура почвы могут быть извлечены из нескольких открытых, но ни один из них не предоставляет полного набора параметров, а процедура доступа к каждому имеет свои технические и организационные особенности. Наиболее сложной оказалась задача получения ионосферных характеристик, поскольку единственным источником, предоставляющим такие данные в открытом доступе, стал китайский портал NSMC (Fengyun), требующий двухэтапной регистрации. В то же время российские спутниковые данные («Метеор-М») на практике недоступны для оперативного исследовательского использования из-за отсутствия открытого интерфейса и необходимости официальных запросов.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

С. А. Подлиннов[1], Т. С. Тимошенко[2], А. В. Берликов[1], А. В. Фатеев[1]
[1]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Томск, Российская Федерация
[2]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ИЗМЕРЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖКИ НА ОСНОВЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Аннотация. Представлена методика определения комплексной относительной диэлектрической проницаемости материала подложки по измеренным параметрам рассеяния микрополосковых линий различной длины. Показано совпадение результатов для ширин 30 и 50 мкм и толщин диэлектрика 8 и 16 мкм.
Ключевые слова*:* материал подложки, микрополосковая линия, параметры рассеяния, зондовая станция, векторный анализатор цепей, дифференциально-амплитудно-фазовый метод, комплексная относительная диэлектрическая проницаемость.
Для цитирования*:* Подлиннов С. А., Тимошенко Т. С., Берликов А. В., Фатеев А. В. Измерение комплексной относительной диэлектрической проницаемости материала подложки на основе микрополосковых линий // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

S. A. Podlinnov[1], T. S. Timoshenko[2], A. V. Berlikov[1], A. V. Fateev[1]
[1]Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

MEASUREMENT OF COMPLEX RELATIVE PERMITTIVITY OF SUBSTRATE MATERIAL BASED ON MICROSTRIP TRANSMISSION LINES

Abstract. The paper presents a method for determining the complex relative permittivity of a substrate material from measured scattering parameters of microstrip transmission lines with different lengths. The results are shown to be in agreement for strip widths of 30 μm and 50 μm and dielectric thicknesses of 8 μm and 16 μm.
Keywords*:* substrate material, microstrip line, scattering parameters, probe station, vector network analyzer, differential-amplitude-phase method, complex relative permittivity.
For citation*:* Podlinnov S. A., Timoshenko T. S., Berlikov A. V., Fateev A. V. Measurement of complex relative permittivity of substrate material based on microstrip transmission lines // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

При проектировании сверхвысокочастотных планарных устройств точность электродинамического моделирования в значительной степени определяется достоверностью параметров материала подложки. Справочные значения комплексной относительной диэлектрической проницаемости часто недостаточны, поскольку реальные характеристики материала зависят от частоты, давления, влажности и температуры. Поэтому актуальна разработка экспериментальной методики, позволяющей получать комплексную относительную диэлектрическую проницаемость непосредственно на печатной плате.

Цель работы состоит в разработке и проверке методики определения комплексной относительной диэлектрической проницаемости материала подложки по результатам измерения параметров рассеяния микрополосковых линий передачи различной длины на зондовой станции с использованием векторного анализатора цепей.

Схема измерений и фотография экспериментальной установки приведены на рис. 1. Поскольку до проведения измерений значения комплексной относительной диэлектрической проницаемости достоверно не известны, были разработаны топологии для двух значений толщины диэлектрического слоя *H* равными 8 мкм и 16 мкм и двух значений ширины проводника микрополосковой линии передачи W равными 30 мкм и 50 мкм. Изготовлены микрополосковые линии передачи нескольких длин от 7,125 мм до 47,4 мм. На рис. 2 представлено поперечное сечение исследуемой микрополосковой линии передачи.

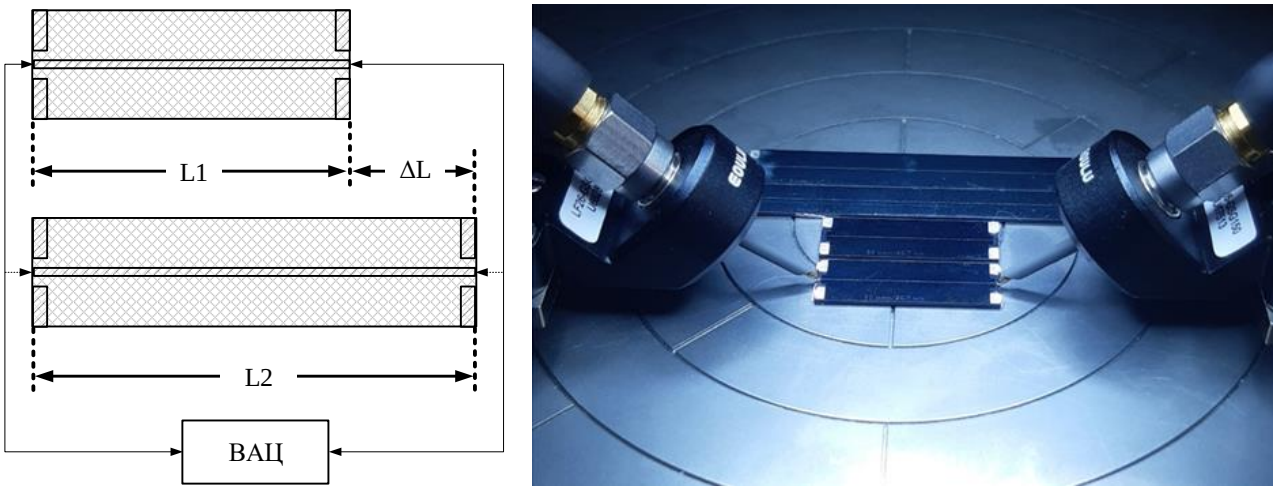
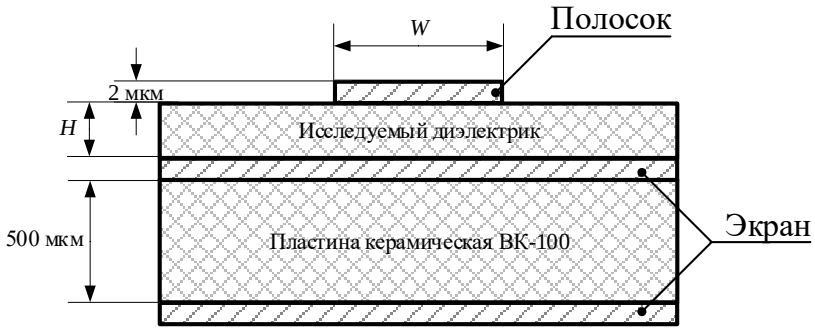


Рис. 1. *Схема и фотография измерительной установки*



W – ширина микрополосковой линии передачи;
H – толщина исследуемого диэлектрика

Рис. 2. *Поперечное сечение микрополосковой линии передачи*

Обработка измеренных данных выполнялась предложенным дифференциально-амплитудно-фазовым методом, основанным на определении собственных векторов произведения матриц передачи микрополосковой линии передачи большей длины и обратной матрицы передачи линии меньшей длины. После вычисления собственных значений и определения знаков показателей степени можно рассчитать комплексную постоянную распространения линии передачи. После определения комплексной постоянной распространения рассчитывалась эффективная комплексная диэлектрическая проницаемость микрополосковой линии передачи. На следующем этапе проводился пересчет от эффективной комплексной относительной диэлектрической проницаемости к параметрам диэлектрика подложки с учетом ширины проводника и толщины диэлектрического слоя.

В отличие от дифференциально-фазового метода предложенный метод измерения комплексной относительной диэлектрической проницаемости подложки имеет ряд преимуществ: он позволяет достоверно оценить мнимую составляющую комплексной относительной диэлектрической проницаемости и учесть коэффициент отражения от перехода на микрополосковую линию передачи.

Полученные частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости приведены на рис. 3. Действительная часть плавно уменьшается с ростом частоты от значения 13,5 до 9,9 в диапазоне частот от 50 МГц до 18 ГГц. Мнимая часть также снижается от 16,5 до 0,3 в измеряемом диапазоне частот. Данные были получены в результате четырех измерений при соблюдении равных внешних условий и однородности исследуемого материала. Учет геометрических параметров микрополосковой линии передачи при обработке проводился с помощью стандартных математических выражений. Обработка результатов проводилась по методу Стьюдента (t-методу). Доверительные интервалы рассчитывались для четырех повторных измерений при доверительной вероятности 95%. Критическое значение коэффициента Стьюдента равнялось 3,2.

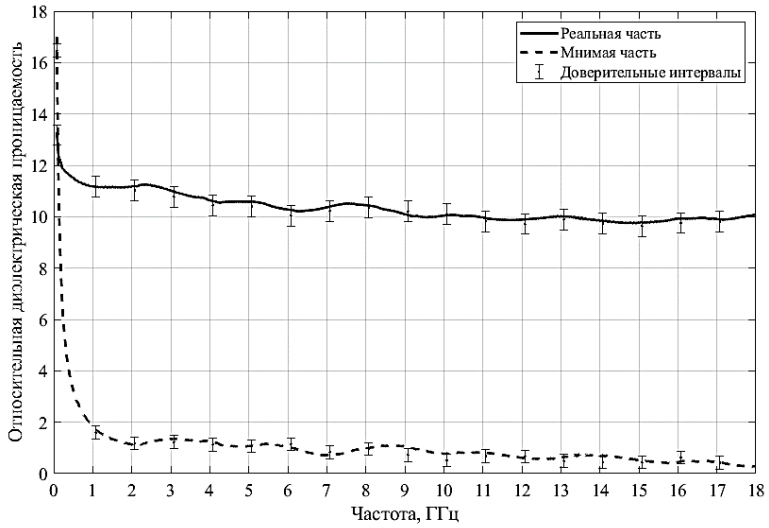


Рис. 3. *Частотные зависимости действительной и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости*

Сравнение результатов измерений для микрополосковых линий с шириной проводника 30 мкм и 50 мкм, а также для толщин диэлектрического слоя 8 мкм и 16 мкм показало их совпадение в пределах доверительных интервалов. Это подтверждает, что разработанная методика обеспечивает определение параметров материала подложки, а не геометрических размеров микрополосковой линии передач.

Важным преимуществом выбранного подхода является учет не только фазового сдвига, но и амплитудных изменений при распространении электромагнитной волны вдоль микрополосковой линии передачи. Предложенная методика позволяет восстановить не только действительную, но и мнимую часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости. Это особенно важно для материалов и тонкопленочных структур, где потери оказывают заметное влияние на параметры распространения электромагнитных волн.

Таким образом, предложенная методика проведения измерений без разрушения образца может быть использована для входного контроля материалов, оценки стабильности технологического процесса и уточнения электродинамических моделей при проектировании планарных СВЧ-устройств в широком частотном диапазоне.

А. В. Репин, О. В. Родионова
Омский государственный педагогический университет, Омск, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЧВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКА С ОТКРЫТЫМ КОНЦОМ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Проведены лабораторные и полевые исследования датчика с открытым концом коаксиальной линии для определения комплексной диэлектрической проницаемости почв. Осуществлена калибровка датчика с использованием эталонных жидкостей. Определены условия для его применения в полевых условиях. Показаны возможности использования датчика для измерения диэлектрической проницаемости почв в зависимости от влажности и плотности. Приведены результаты полевых измерений, полученных с помощью датчика.
Ключевые слова*:* датчик с открытым концом, диэлектрическая проницаемость почв, полевые измерения, калибровочные жидкости, коаксиальная линия.
Для цитирования*:* Репин А. В., Родионова О. В. Особенности измерения диэлектрической проницаемости почв с использованием датчика с открытым концом в полевых условиях // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. V. Repin, O. V. Rodionova
Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russian Federation

FEATURES OF MEASURING THE DIELECTRIC CONSTANT OF SOILS USING AN OPEN-END SENSOR IN THE FIELD

Abstract. Laboratory and field studies were conducted using a sensor with an open-ended coaxial line to determine the complex permittivity of soils. The sensor was calibrated using reference liquids. Conditions for its use in the field were determined. The paper demonstrates the potential of the sensor for measuring soil permittivity depending on moisture content and density. The authors present the results of field measurements obtained using the sensor.
Keywords*:* open-end sensor, soil permittivity, field measurements, calibration fluids, coaxial line.
For citation*:* Repin A. V., Rodionova O. V. Features of measuring the dielectric constant of soils using an open-end sensor in the field // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Данные о комплексной диэлектрической проницаемости влажных почв в мега и гигагерцовом диапазоне частот востребованы для решения микроволновой радиометрии, интерпретации данных георадаров и т. д. В большинстве случаев их получают из различных моделей, полученных на основе лабораторных измерений с применением направленных структур или конденсаторных ячеек. Однако применение этих методик требует разрушение естественных почвенных агрегатов при помещении в измерительную ячейку. В качестве альтернативного неразрушающего метода можно использовать датчик на основе открытого конца коаксиальной линии. Поэтому целью работы является изучение возможности применения этого датчика для измерения диэлектрической проницаемости почв в полевых условиях.

Исследуемый датчик представляет собой отрезок коаксиальной линии с разъемом типа N. Датчик имеет диаметр внутреннего проводника 2 мм, внешнего проводника 7 мм. Пространство между проводниками заполнено фторопластом с диэлектрической

проницаемостью ε'=2,04, снаружи выполнен в форме квадрата со стороной 17,5 мм. Для его использования, необходимо проводить одноступенчатую процедуру калибровки, описанную в литературе, которая основана на билинейной зависимости между измеренным с помощью векторного анализатора цепей коэффициентом отражения S11 и комплексной диэлектрической проницаемостью ε* соответствующих эталонных материалов.

Лабораторные измерения проводились с использованием векторного анализатора цепей ROHDE&SCHWARZ ZNB8 в диапазоне частот от 50 МГц до 8,5 ГГц. Для полевых измерений был выбран компактный векторный анализатор цепей nanoVNA SV4401A, имеющий для подключения тот же разъем типа N. Он оснащён аккумуляторной батареей (время автономной работы до 4–5 часов), встроенной памятью (8 Гб) для хранения данных и дисплеем (1024 x 600) с сенсорным меню. Измеряет в диапазоне от 50 кГц до 4,4 ГГц коэффициенты отражения S11 и прохождения S12 с сохранением данных в текстовом формате. Недостатком измерителя, является зависимость результатов измерений от температуры внешней среды, что требует проводить повторную калибровку прибора перед каждой серией измерений.

В качестве калибровочной жидкости была выбрана деионизированная вода, т.к. зависимость её параметров модели Дебая от температуры и солености хорошо известны. Для выяснения рабочего диапазона датчика были проведены измерения органических жидкостей: диметилсульфоксида, изопропилового спирта, концентрата этилового спирта (95%). На зависимостях для жидкостей видно (рис. 1*а*), что в диапазоне от 50 МГц до 2 ГГц экспериментальные значения совпадают со значениями, рассчитанными по модели Дебая для этих жидкостей как по действительной (ε'), так и по мнимой (ε") частям комплексной диэлектрической проницаемости.

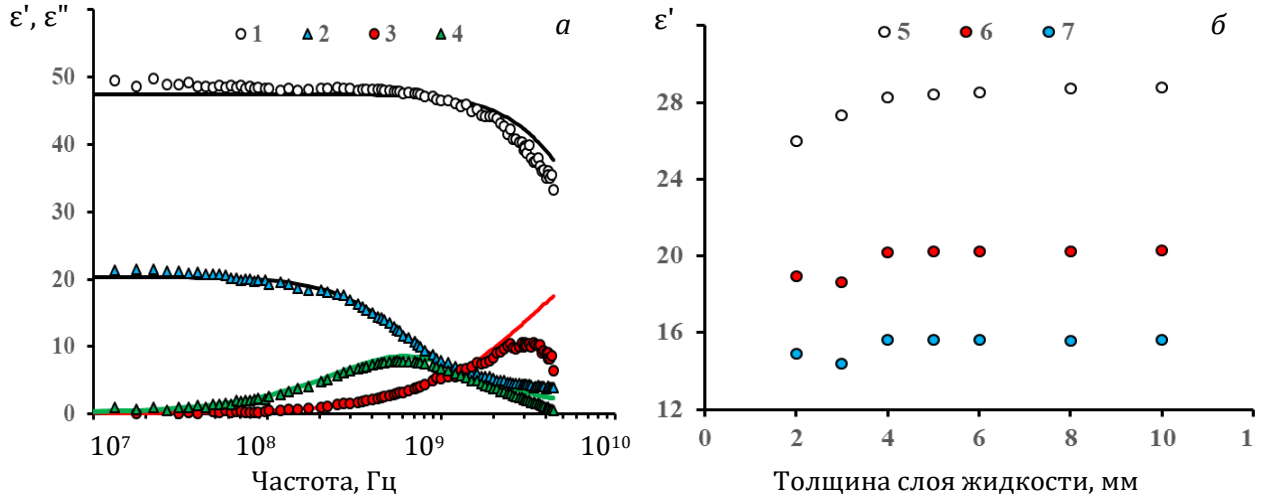


Рис. 1. *а – Спектры действительной ε' (1, 2) и мнимой ε" (3, 4) частей комплексной диэлектрической проницаемости для диметилсульфоксида (1, 3) и изопропилового спирта (2, 4). Сплошные линии-модель Дебая.*
б – Зависимость действительной ε' части комплексной диэлектрической проницаемости от толщины слоя для этилового спирта (95%) для частот 100 МГц (5), 1 ГГц (6) и 1,5 ГГц (7)

Для датчиков этого типа рассматривается вопрос величине области распространения поля в исследуемую диэлектрическую среду. Как правило она зависит от геометрических размеров датчика. Нами были проведены диэлектрические измерения деионизированной воды и этилового спирта в зависимости от толщины слоя жидкости. Приведенные на рис. 1*б* кривые для этилового спирта показывают, что толщина при которой измеренные значения совпадают с эталонными, составляет 4–5 мм. Аналогичные результаты получаются для деионизированной воды. Поэтому, при измерениях толщина исследуемой среды должна быть больше 6–10 мм. Область среды, в которую проникает

поле в сторону от зонда составляет не менее 7 мм.

Были проведены полевые измерения 21.05.2026 в Называевском районе Омской области на поле, засеянном пшеницей. Измерения проводились в шурфе шириной 20 см, длиной 40 см и глубиной 25 см, в котором одна из стенок делалась вертикальной и гладкой, чтобы не происходило разрушение почвенных слоев и их перемешивание. Значения диэлектрической проницаемости влажной почвы на двух частотах в зависимости от глубины приведены на рис. 2*а* и хорошо согласуются с профилем влажности.

Однако было выяснено, что значения диэлектрической проницаемости в верхних слоях (0–1 см, 1–2 см и 2–3 см) при повторных измерениях сильно отличаются. Вероятно, это происходит из-за различного усилия при размещении датчика на слое почвы, что приводит к увеличению плотности почвы, а соответственно и объёмной влажности.

Исследование влияние уплотнения проводилось при помощи специальной пресс-формы размеры которой в сечении представляли квадрат с стороной равной размеру датчика и высотой 3 см. Образец почвы помещался в форму, затем датчик был закреплен сверху соприкасаясь с почвой и проводились измерения. После этого при помощи столика пресс-форма перемещалась вверх и происходило уплотнение почвы и снова проводились измерения. Эта процедура проводилась несколько раз, при этом весовая влажность не изменялась, в объемная увеличивалась, как и плотность. На рис. 2*б* показано, что в зависимости от величины плотности диэлектрическая проницаемость почвы может существенно отличаться. Поэтому при измерении диэлектрической проницаемости верхнего слоя при помощи данного датчика необходимо либо проводить измерения несколько раз, либо использовать значения весовой влажности.

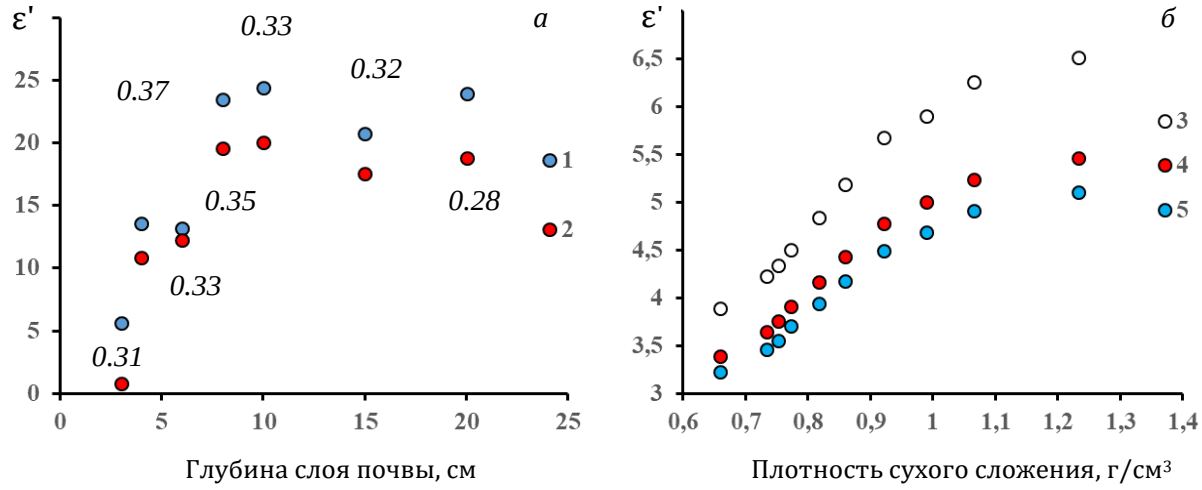


Рис. 2. *а – Зависимость действительной ε' части комплексной диэлектрической проницаемости от глубины слоя почвы на частотах 100 МГц (1) и 1 ГГц (2). Цифрами показана весовая влажность слоя почвы*

б – Зависимость действительной ε' части диэлектрической проницаемости от плотности сухого сложения для почвы с одинаковой весовой влажностью на частотах 100 МГц (3), 500 МГц (4) и 1 ГГц (5)

Показано, что частотный диапазон измерения диэлектрической проницаемости датчика с открытым концом в полевых условиях составляет 50 МГц – 2 ГГц. Установлено, что физический размер исследуемой среды должен составлять не менее 10 мм в глубину и не менее 10 мм в стороны от зонда. Измерения лучше всего проводить в шурфе с вертикальной стенкой. При интерпретации результатов, полученных в верхнем слое нужно учитывать условия проведения измерений.

Таким образом данный датчик может применяться для полевых измерений профиля диэлектрической проницаемости с шагом по глубине 1–2 см, что особенно актуально для интерпретации данных микроволновой радиометрии.

А. В. Репин, О. В. Родионова
Омский государственный педагогический университет, Омск, Российская Федерация

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЧВЫ, ИЗМЕРЕННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ ДАТЧИКОВ

Аннотация. Приведены результаты полевых измерений комплексной диэлектрической проницаемости почв. Использовался датчик на основе коаксиальной линии с открытым концом. Второй датчик представляет собой измерительную ячейку на основе симметричной полосковой линии с разомкнутым внешним концом. Калибровка датчиков осуществлялась с использованием эталонных диэлектрических жидкостей. Сравнение результатов полевых измерений, полученных с использованием датчиков, показало хорошее совпадение между собой и данными лабораторных измерений.
***Ключевые слова**:* датчик с открытым концом, симметричная полосковая линия, диэлектрическая проницаемость почв, полевые измерения, калибровочные жидкости, коаксиальная линия.
***Для цитирования**:* Репин А. В., Родионова О.В. Результаты полевых исследований диэлектрической проницаемости почвы, измеренной с использованием двух датчиков // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. V. Repin, O. V. Rodionova
Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russian Federation

RESULTS OF FIELD STUDIES OF SOIL DIELECTRIC PERMITTIVITY MEASURED USING TWO SENSORS

Abstract. This paper presents the results of field measurements of the complex permittivity of soils. The first sensor is based on an open-ended coaxial line. The second sensor is a measuring cell based on a symmetrical stripline with an open outer end. The sensors were calibrated using standard dielectric fluids. A comparison of the field measurement results obtained using these sensors showed good agreement with laboratory data.
***Keywords**:* Open-end sensor, symmetrical strip line, soil permittivity, field measurements, calibration fluids, coaxial line.
***For citation**:* Repin A. V., Rodionova O. V. Results of field measurements of soil dielectric permittivity obtained using two sensors // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Для решения задач микроволновой радиометрии при использовании данных спутниковых аппаратов необходима информация о комплексной диэлектрической проницаемости влажных почв в поверхностном слое в широком диапазоне частот. Они необходимы для моделирования процессов оттаивания, замерзания, увлажнения и высыхания почв. В большинстве случаев их получают из различных диэлектрических моделей, полученных на основе лабораторных измерений. Однако для более точной интерпретации результатов спутниковых и желательно иметь данные полевых измерений. Поэтому целью работы является исследование возможности применения датчиков для измерения диэлектрической проницаемости почв в полевых условиях. Для решения этой задачи

было протестировано два датчика.

Первый датчик был создан на основе открытого конца коаксиальной линии. Датчик представляет собой отрезок коаксиальной линии с разъемом типа N (рис. 1а) с внутренним диаметром проводника 2 мм и внешним диаметром проводника 7 мм. Снаружи он выполнен в форме квадрата со стороной 17,5 мм, пространство между проводниками заполнено фторопластом. Диэлектрическая проницаемость определяется после проведения одноступенчатой процедуры калибровки, описанной в литературе, которая основана на билинейной зависимости между измеренным с помощью векторного анализатора цепей коэффициентом отражения S_{11} и комплексной диэлектрической проницаемостью ε* соответствующих эталонных диэлектрических жидкостей. Калибровочной жидкостью была выбрана вода, т.к. зависимость её параметров модели Дебая от температуры и солености хорошо известны в литературе.

Рис. 1. *а – Внешний вид датчика на основе открытого конца коаксиальной линии, б – внешний вид датчика на основе симметричной полосковой линии, в – векторный анализатор цепей SV4401A со вторым датчиком, г – измерения при помощи первого датчика в шурфе*

Второй датчик разработан на основе симметричной полосковой линии с разомкнутым внешним концом (рис. 1б). Размеры внешних проводников выбраны путем электродинамического моделирования, и позволяют пренебречь потерями на излучение из конца линии датчика. При этом измеряемый объем почвы составляет 79,4 $см^3$, что также позволит уменьшить влияние размеров почвенных агрегатов. При расчете комплексной диэлектрической проницаемости до 100 МГц использовалась эквивалентная схема датчика на сосредоточенных элементах, в высокочастотной области использовалась схема на распределенных элементах. Для расчета диэлектрической проницаемости измерялся комплексный коэффициент отражения S_{11} от входа датчика. Так же предварительно проводилось измерение калибровочных жидкостей для построения регрессионных уравнений взаимосвязи комплексного коэффициента отражения с действительной (ε') и мнимой (ε") частями комплексной диэлектрической проницаемости этих материалов. Определение комплексной диэлектрической проницаемости почв производилось с использованием этих уравнений.

Оба датчика позволяют измерять диэлектрические характеристики в полевых условиях без разрушения и перемешивания слоев почвы.

Для полевых измерений использовался компактный векторный анализатор цепей nanoVNA SV4401A (рис. 1в), имеющий для подключения разъем типа N и переходники для перехода на разъем типа SMA. Он способен измерять коэффициенты отражения S_{11} и прохождения S_{12} с сохранением данных в текстовом формате в диапазоне частот от 50 кГц до 4,4 ГГц. Время автономной работы до 5 часов, имеет дисплей (1024 x 600) с сенсорным меню и встроенную память (8 Гб) для хранения данных. При тестировании выяснено, что результаты измерений зависят от температуры внешней среды, что требует проведения повторной калибровку прибора перед каждой серией измерений. Лабораторные измерения проводились с использованием векторного анализатора цепей ZNB20 в диапазоне частот 0,1 МГц – 18 ГГц.

Полевые измерения проводились в Называевском районе Омской области на поле,

засеянном пшеницей 4 апреля 2026. Почва засолена по хлоридно-сульфатному кальциево-натриевому типу в средней степени, сумма токсичных солей 0,31–0,35%. Для измерения датчиком на основе открытого конца коаксиальной линии был подготовлен шурф шириной 20 см, длиной 40 см и глубиной 25 см, в котором одна из стенок делалась вертикальной и гладкой (рис. 1г).

Измерения первым датчиком были проведены в шурфе с шагом 2 см по глубине, вторым датчиком в слое 0-4,5 см в двух точках отстоящих друг от друга на 10 м. Диэлектрические спектры для почвы представлены на рис. 2. Плотность почвы для кривой 3 составляла 1,22 г/см^3, а объёмная влажность 0,45 см^3/см^3. Средняя плотность для кривых 1 и 2 составляла 1,17 г/см^3, а объёмная влажность 0,50 см^3/см^3. Хорошо видно, что для данной влажности значения действительной части ε' совпадают в диапазоне частот от 40 МГц до 500 МГц, а значения мнимой части ε" совпадают в диапазоне частот от 4 МГц до 40 МГц.

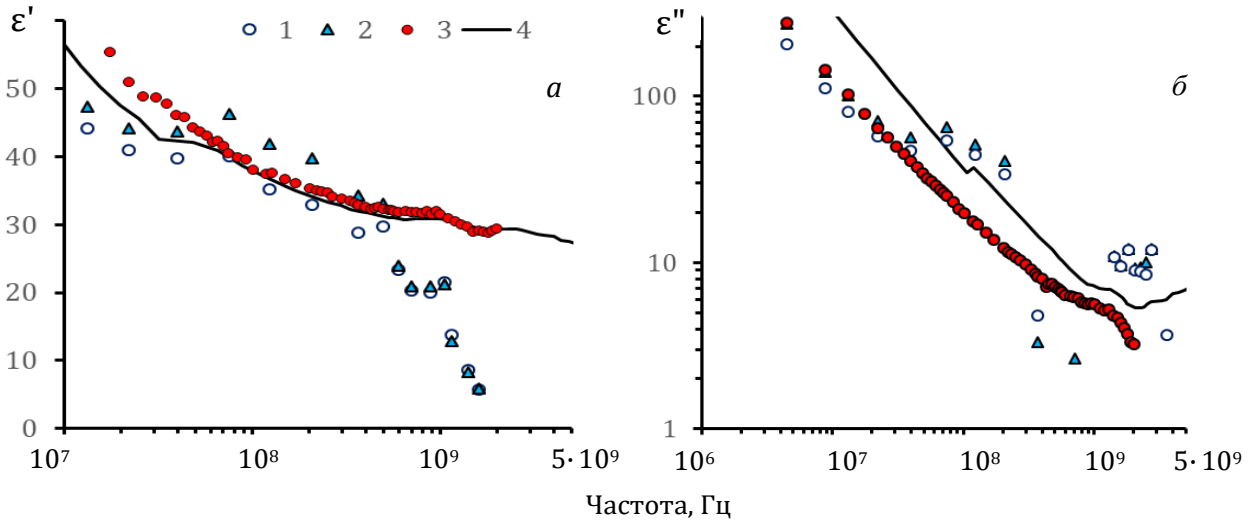


Рис. 2. *а – Зависимость действительной ε' части комплексной диэлектрической проницаемости почвы от частоты. б – Зависимость мнимой ε" части диэлектрической проницаемости почвы от частоты. 1 – точка 1 измеренная вторым датчиком, 2– точка 2 измеренная вторым датчиком, 3 – данные полученные из слоя 4-6 см измеренные первым датчиком, 4 – лабораторные измерения*

Сравнение двух методов показывает, что первый способ позволяет получить спектр в диапазоне частот от 10 МГц до 2 ГГц. Второй датчик позволяет восстановить значения ε' до частоты 500 МГц, а значения ε" только до частоты 40 МГц. Также были проведены лабораторные измерения этой почвы, взятой с глубины 5–10 см (рис. 2). Плотность почвы для кривой 4 составляла 1,25 г/см^3, а объёмная влажность 0,50 см^3/см^3. Данные лабораторных измерений хорошо совпадают с данными полевых измерений по действительной ε', значения мнимой части ε" имеют более высокие значения. Возможно это говорит о более высокой засоленности слоя 5–10 см, по сравнению со слоем 0–5 см.

Таким образом показано, что оба датчика способны измерять значения комплексной диэлектрической проницаемости в полевых условиях. Первый датчик достаточно хорошо восстанавливает спектр в широком диапазоне частот. Второй метод имеет более узкую полосу работы. Тем не менее в перекрывающихся диапазонах значения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости для почвы, находящейся в одинаковых условиях хорошо совпали.

А. В. Смотров
Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского
Жуковский, Московская область, Российская Федерация

ОБ ОГРАНИЧЕНИЯХ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ ПРИ БЕСКОНТАКТНОМ СЪЕМЕ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. Проанализированы основные электрофизические и радиофизические методы исследования динамических характеристик конструкций при бесконтактном съеме информации. Указаны объекты испытаний и организации, их выполняющие. Сформулированы основные ограничения при практическом применении методов.
Ключевые слова*:* методы исследования основных динамических характеристик конструкций.
Для цитирования*:* Смотров А. В. Об ограничениях радиофизических и электрофизических методов исследования динамических характеристик конструкций при бесконтактном съеме информации // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. V. Smotrov
Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky
Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation

ON RADIOPHYSICAL AND ELECTROPHYSICAL METHODS LIMITATIONS FOR RESEARCH OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF STRUCTURES DURING NON-CONTACT DATA ACQUISITION

Abstract. The paper analyzes the main electrophysical and radiophysical methods for research of the dynamic characteristics of structures using non-contact data acquisition, specifies test objects and organizations carrying out the tests, and formulates the main limitations in the practical application of the methods.
Keywords*:* methods for research of the main dynamic characteristics of structures.
For citation*:* Smotrov A. V. On radiophysical and electrophysical methods limitations for research of the dynamic characteristics of structures during non-contact data acquisition // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

К основным динамическим характеристикам относятся резонансные (близкие к собственным) частоты, формы, коэффициенты демпфирования и обобщенные массы тонов колебаний. Их совокупность, называемая иногда частотным паспортом (свидетельством), используется для верификации и коррекции расчетной динамической схемы испытываемой конструкции или ее агрегатов, сравнении динамических характеристик натурной конструкции и ее физических и расчетных моделей, контроль соответствия характеристик материалов и деталей заданным требованиям. В авиастроительной области экспериментальное исследование динамических характеристик называется наземными частотными испытаниями, которые проводятся с целью получения доказательного материала для выдачи заключений по безопасности воздушных судов от явлений аэроупругости, выявления уровня динамических нагрузок, проведения вибродиагностики.

Количественное определение динамических характеристик в зависимости от решаемых задач выполняется с помощью набора электрофизических и/или радиофизических методов, основывающихся на следующих принципах: прямой пьезоэффект (пьезоэлектрические акселерометры), эффект Доплера (лазерная виброметрия, микроволновая радиолокация), интерференция (голографическая и спекл-интерферометрия), явление электромагнитной индукции (вихретоковые датчики), взаимосвязь напряженности электрического поля и разности потенциалов (емкостные датчики).

В подавляющем большинстве научных организаций штатная методика определения основных динамических характеристик машиностроительных изделий базируется на так называемом методе «фазового резонанса» («пошагового синуса»), использовании контактных виброизмерительных преобразователей (как правило, акселерометров) и присоединенных вибраторов. Их достоинства и недостатки подробно освещены в многочисленных публикациях и не являются предметом рассмотрения настоящей работы.

В случае же проведения частотных испытаний малогабаритных, легких и имеющих сложную форму конструкций, а также при необходимости выполнить измерения в труднодоступных местах (например, при повышенных температурах или на большом расстоянии) применяют бесконтактный съем информации. Так в ЦАГИ, ЦИАМ, НИКИЭТ, РКЦ «Прогресс» и других организациях динамические характеристики турбинных лопаток, имеющих высокие собственные частоты, традиционно исследуют с помощью голографической и спекл-интерферометрии. Частотные испытания небольших лопастей винтов воздушных (например, в Пермском политехническом и Самарском университетах) и речных/морских судов (например, в НИЦ им. А.Н. Крылова, НПО «Винт», Дальневосточном федеральном университете) проводят с использованием лазерных доплеровских виброметров. Они также удобны при регистрации параметров колебаний высотных и протяженных сооружений.

Значительно реже делаются попытки исследования динамических характеристик конструкций с помощью «чистых» электрофизических методов. Хотя в теории как вихретоковые, как и емкостные, датчики позволяют определять не только резонансные частоты, но и амплитуды колебаний в точках измерений в рассматриваемом вопросе они, как правило, служат целям мониторинга вибрации вращающихся металлических конструкций (валы компрессоров, насосов и пр.). Например, широко освещено в печати успешное использование вихретоковых датчиков в ходе экспериментов на динамических разгонных стендах ЦИАМ при исследовании турбинных лопаток. Сфера применения емкостных датчиков аналогична, но они имеют преимущество – возможность работать в условиях высоких температур (до 1000°С) и значительной радиации (до 10^7 рад), к тому же в отличие от вихретоковых, они не чувствительны к масляному слою при измерении радиального смещения вала, вращающегося в подшипниках скольжения.

Известны публикации с рекомендациями внедрить альтернативные физические методы. Например, независимо друг от друга ученые Саратовского гос. университета и Белорусского гос. университета информатики и радиоэлектроники предложили измерять вибрацию валов турбин радиоволновым (СВЧ диапазон) фазовым методом, а специалисты НПП «Элмика» (г. Зеленоград, Россия) и их коллеги из Минского электромеханического завода даже создали работающие на этом принципе радиоволновые датчики для контроля линейных и вращательных колебаний.

Для всех рассматриваемых электрофизических методов исследования динамических характеристик конструкций наличие работающих радиопередающих устройств и действующих источников индустриальных электромагнитных помех – главная преграда выполнения качественных измерений (смещение нуля, нелинейные искажения, интерференция полезных и генерация паразитных сигналов). Такие ситуации не редкость, когда наземные частотные испытания проводятся в заводских или аэродромных условиях.

Недостатки пьезоэлектрических акселерометров, являющихся штатными «контактными» первичными измерительными преобразователями при наземных частотных испытаниях, и технические решения по их устранению достаточно подробно представлены в научно-технической литературе в отличие от имеющихся ограничений измерительных преобразователей, базирующихся на других физических принципах, основные из которых указаны ниже.

Ограничения присущие радиофизическим и электрофизическим методоам исследования динамических характеристик конструкций при наличии у них бесспорных преимуществ, заключающихся в бесконтактности съема информации, все же значительно сужают области практического применения, хотя об этом не всегда упоминают исполнители и не знают многие заказчики работ.

Лазерная виброметрия, микроволновая радиолокация, голографическая и спекл-интерферометрия требуют хорошую виброизоляцию средств измерений, что порой непросто обеспечить. Согласованность между измерительными точками и синхронизация каналов невозможны, когда амплитуды колебаний частей испытываемой конструкции достигают десятков миллиметров (такие требования имеются при проведении наземных частотных испытаний натурных конструкций). Это приводит к исчезновению точной привязки «цифровых» координат к физическим. Большие амплитуды – препятствие для интерферометрических и лазерных виброметрических методов (особенно при использовании сканирующих систем).

Как правило, воспроизводимость условий испытаний у методов с бесконтактным съемом информации значительно чувствительней, чем у «контакных». Она сильно зависит от многих факторов: стабильности оптической / радиолинии сбора экспериментальных данных, например, наличие воздушных / тепловых потоков, аэрозолей / пыли в воздухе являются лимитирующими факторами. Для лазерной виброметрии еще одно затруднение возникает при работе с сильно отражающими объектами испытаний, требуется либо матировать их поверхности, либо наносить контрастные метки.

Емкостные датчики дают неверные данные при загрязненном состоянии измеряемых поверхностей (масло, влага, пыль), у вихретоковых – замена конструкционного материала может повлечь ошибки масштаба и линейности.

Выбор наиболее приемлемого радио- и / или электрофизического метода при исследовании динамических характеристик конкретной конструкции всегда остается за руководителем работ (ведущим по испытаниям). Именно по этому признаку наземные частотные испытания являются специальным технологическим процессом.

Д. В. Соколов, Ю. А. Стенькин, В. В. Болотов, Е. В. Князев
Н. А. Давлеткильдеев, С. Н. Несов, К. Е. Ивлев
Омский научный центр СО РАН, Омск, Российская Федерация

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЕВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК С ОКСИДОМ РЕНИЯ (IV) ПРИ ЭКСПОЗИЦИИ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ГАЗАХ

Аннотация. Получены нанокомпозиты на основе многостенных углеродных нанотрубок и оксида рения (IV) с многократным синтезом. Определено изменение сопротивления слоев нанокомпозитов в среде распространенных H_2-содержащих газов. Установлено, что образец после 3-го цикла синтеза обладает селективностью H_2S с откликом более 70%.
***Ключевые слова**:* нанокомпозит, нанотрубки, рений, сопротивление, сенсорный отклик.
***Для цитирования**:* Соколов Д. В., Стенькин Ю. А., Болотов В. В., Князев Е. В., Давлеткильдеев Н. А., Несов С. Н., Ивлев К. Е. Электрофизические исследования слоев углеродных нанотрубок с оксидом рения (IV) при экспозиции в водородосодержащих газах // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

D. V. Sokolov, Y. A. Stenkin, V. V. Bolotov, E. V. Knyazev
N. A. Davletkildeev, S. N. Nesov, K. E. Ivlev
Omsk Scientific Center SB RAS, Omsk, Russian Federation

ELECTROPHYSICAL STUDIES OF CARBON NANOTUBE LAYERS WITH RHENIUM (IV) OXIDE UPON EXPOSURE TO HYDROGEN-CONTAINING GASES

Abstract. Nanocomposites based on multi-walled carbon nanotubes and rhenium (IV) oxide were prepared by a multiple-synthesis. The authors revealed the resistance changes of the nanocomposite layers in the common H_2-containing medium. It was found that the sample after the third synthesis cycle has selectivity to hydrogen sulfide with a response more than 70%.
***Keywords**:* nanocomposite, nanotube, rhenium, resistance, sensor response.
***For citation**:* Sokolov D. V., Stenkin Y. A., Bolotov V. V., Knyazev E. V., Davletkildeev N. A., Nesov S. N., Ivlev K. E. Electrophysical study of carbon nanotube layers with rhenium (IV) oxide upon exposure to hydrogen-containing gases // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Один из способов усилить ключевые характеристики суперконденсаторов, газовых сенсоров и топливных элементов является использование нанокомпозитов на основе многостенных углеродных нанотрубок и оксидов металлов. В качестве металлической компоненты перспективны благородные металлы, альтернативой которым могут являться близкие к платиновому ряду переходные металлы, такие как рений. Стоит отметить о практически полном отсутствии подробных электрофизических исследований нанокомпозитов на основе углеродных нанотрубок и рений-содержащих соединений. В данной работе впервые установлено влияние адсорбции водородосодержащих газов на сопротивления слоя нанотрубок, покрытых оксидом рения.

Нанокомпозиты формировались на массиве многостенных углеродных нанотрубок (марки МУНТ-1, Институт катализа СО РАН, Новосибирск), которые добавлялись в

4%-водный раствор перрената аммония (NH_4ReO_4), выдерживались в течение 30 мин и сушились 24 ч. Полученный сухой остаток отжигался в инертной среде при 380°С в течение 1 ч для разложения перрената до формирования оксида рения (IV): $NH_4ReO_4 \rightarrow 2ReO_2+N_2+4H_2O$. Увеличение концентрации оксида рения на поверхности проводилось путем повторения процедуры выдерживания нанотрубок в растворе NH_4ReO_4, до трех циклов, включительно. Итоговые массивы в виде порошка, добавленного в дихлорметан, диспергировались в ультразвуке в течение 5 мин и многократно высаживались на ситалловую подложку до формирования сплошного слоя.

Продольные вольт-амперные характеристики слоев измерялись между двумя позолоченными электродами (расстояние 2 мм) в закрытой ячейке при температуре (20±3) °С и влажности (60±3) % с введением следующих газов с концентрацией 800 ппм: водород (H_2), ацетилен (C_2H_2), метан (CH_4), аммиак (NH_3), сероводород (H_2S), этанол (C_2H_5OH) и бензол (C_6H_6). Величина отклика к газам определялась как относительное изменение сопротивления.

Было обнаружено, что вольт-амперные характеристики слоев исходных и композитных нанотрубок имеют практически линейную форму (рис. 1). Сопротивление слоя нанотрубок составило 1623 Ом, сопротивление композитных слоев после одного, двух и трех циклов синтеза – 375, 268 и 130 Ом, соответственно. Полученные значения сопротивления и данные энергодисперсионного анализа (концентрация рения более 1 ат.%) подтверждают покрытие поверхности нанотрубок оксидом.

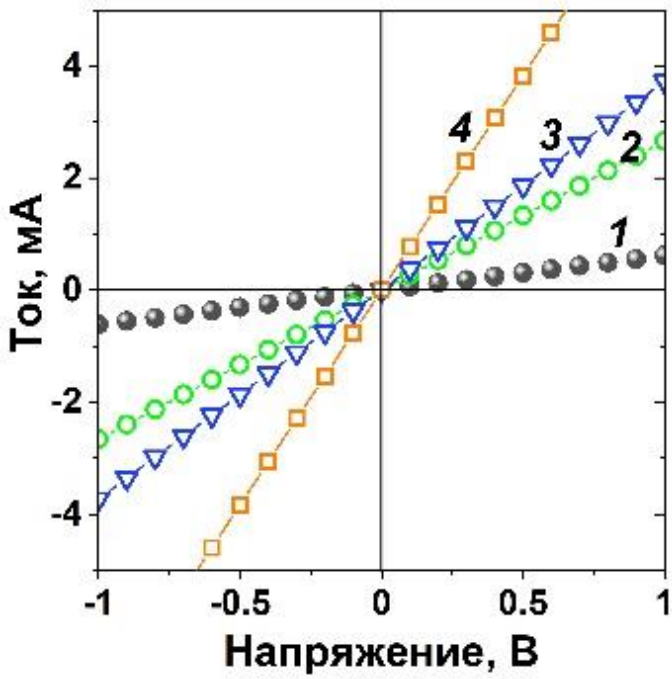


Рис. 1. *Вольт-амперные характеристики слоев нанотрубок: исходные (1) и покрытые оксидом рения: 2 – после 1-го цикла, 3 – после 2 циклов, 4 – после 3 циклов синтеза*

Исходя из полученных результатов электрофизических измерений были получены наибольшие изменения сопротивления у образца после 3-х циклов синтеза – к NH_3, H_2S и C_2H_2 (рис. 2). При этом зарегистрирована выраженная селективность к H_2S с откликом в ~72%.

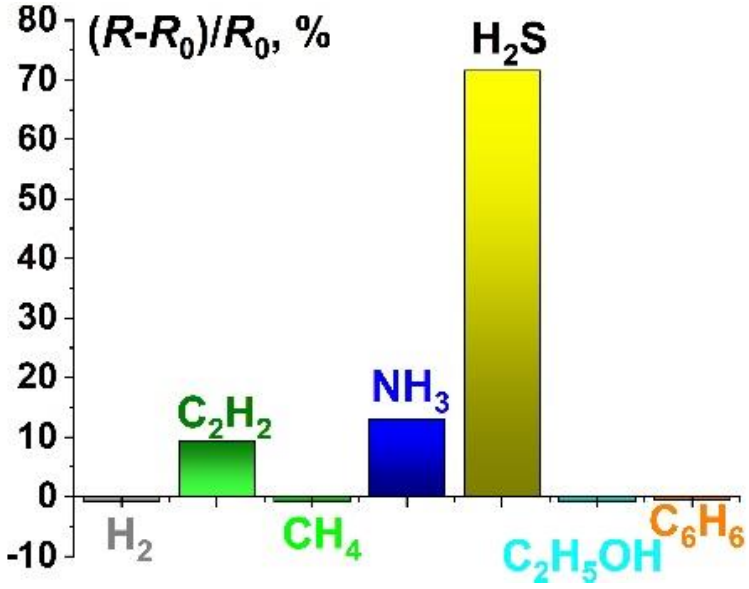


Рис. 2. *Относительное изменение сопротивления нанокомпозита после 3 циклов синтеза*

Таким образом, предложенная методика многократного синтеза позволяет сформировать оксид рения на поверхности нанотрубок. Наличие рения на поверхности после третьего цикла синтеза приводит к заметному изменению сопротивления нанокомпозита в атмосфере NH_3, C_2H_2 и H_2S, с наибольшим откликом к последнему. Полученные результаты могут быть использованы для синтеза новых материалов для сенсоров и топливных элементов, активно реагирующих на сероводород.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 126012716038-5).

С. Д. Ханин[1], Ю. С. Остроумова[2]
[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. профессора М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова
Санкт-Петербург, Российская Федерация

СПЕКТРОСКОПИЯ ПОЛНОЙ ПРОВОДИМОСТИ КАК МЕТОД ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ДИНАМИКИ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

Аннотация. Определены и обоснованы возможности, которые открывает спектроскопия полной проводимости для эффективной подвижности носителей заряда в неупорядоченных пленочных диэлектриках и прогнозирования динамики их электрического разрушения. Представлены разработанные в целях характеризации динамики транспортных процессов методики, могущие найти полезное применение в электронном материаловедении и технологии.
Ключевые слова: пленочные диэлектрики, неупорядоченность, случайная неоднородность, транспортные процессы, динамическая проводимость, тангенс угла диэлектрических потерь.
Для цитирования: Ханин С. Д. Остроумова Ю. С. Спектроскопия полной проводимости как метод характеризации динамики транспортных процессов в неупорядоченных пленочных диэлектриках // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной конференции (6-8 октября 2026 года, Омск, Россия) Омск : ОНИИП, 2026.

S. D. Khanin[1], Yu. S. Ostroumova[2]
[1]The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications
Saint Petersburg, Russian Federation
[2]Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russian Federation

COMPLEX CONDUCTIVITY SPECTROSCOPY AS A METHOD FOR CHARACTERIZING THE DYNAMICS OF TRANSPORT PROCESSES IN DISORDERED FILM DIELECTRICS

Abstract. The paper examines the capabilities of complex conductivity spectroscopy for determining the effective mobility of charge carriers in disordered film dielectrics and predicting the dynamics of their electrical breakdown. Methods developed for characterizing the dynamics of transport processes may find useful applications in electronic materials science and technology.
Keywords: film dielectrics, disorder, random inhomogeneity, transport processes, dynamic conductivity, dielectric loss tangent.
For citation: Khanin S. D., Ostroumova Yu. S. Complex conductivity spectroscopy as a method for characterizing the dynamics of transport processes in disordered film dielectrics // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Свойственная диэлектрическим пленкам неупорядоченность атомной структуры предопределяет их высокие электроизолирующие свойства, благодаря которым они находят широкое и всевозрастающее применение для создания элементов функцио-

нальной электроники. Неупорядоченность структуры, с другой стороны, резко ограничивает возможности определения требуемых для построения физической картины процессов, определяющих эти свойства кинетических параметров.

Традиционно в целях определения подвижности носителей заряда методы, основанные на измерениях холловского напряжения и термо-ЭДС, в отношении материалов с неупорядоченной структурой привычным образом не работают. Область применения разработанного для определения подвижности носителей заряда метода дисперсионного транспорта ограничивается материалами с не слишком низкой подвижностью носителей заряда. Для представляющих же принципиальный интерес материалов с сильной локализацией носителей заряда, таких как диэлектрические оксиды d-элементов, требуемое для фиксации время пролета носителей через образец, даже при субмикронных его толщинах, может оказаться столь большим, что применение метода дисперсионного транспорта не реалистично.

Еще одной предпосылкой для изыскания новых методов характеризации динамики транспортных процессов в диэлектрических пленках является сопряженная с неупорядоченностью структуры её случайная неоднородность на мезоскопическом уровне, которая в плане устойчивости материалов к длительному электрическому нагружению может оказаться потенциально опасной и вместе с тем недоступной для выявления на основе результатов измерений, принятых для оценки качества параметров.

В качестве действенного метода в решении указанных вопросов, как показывается в настоящей работе, может служить спектроскопия полной проводимости в области инфразвуковых и звуковых частот. Развиваемая в пользу применения этого метода аргументация базируется на результатах исследования кинетических явлений в представительных для функциональных неупорядоченных материалов с сильной локализацией носителей заряда аморфных диэлектрических пленках оксидов тантала и ниобия, получаемых на поверхности этих металлов электрохимическим методом.

Разработка предлагаемой методики определения подвижности носителей заряда берет свое начало в изучении экспериментально обнаруженного у указанных материалов эффекта фотопамяти, состоящего в появлении в частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\ \delta$) у образцов, подвергнутых оптическому воздействию ультрафиолетового излучения, максимума, который с течением прошедшего после оптического возбуждения времени смещается в сторону более низких частот и возрастает по величине.

В целях объяснения установленного эффекта предлагается модель, исходящая из допущений о возникновении в пленочном материале при оптическом возбуждении в собственной области поглощения двуслойности по проводимости и смещении со временем границы раздела этих слоев по направлению к базовому металлу. Анализ, этой модели, показывает, что на достаточно больших временах $tg\ \delta$ линейно возрастает со временем, причем скорость этого роста пропорциональна подвижности, что указывает на возможность определения последней, не дожидаясь пролета носителя через весь образец.

Результаты проведенных экспериментов подтверждают прогноз теории. Восстановленная из опытных данных величина подвижности (точнее, учитывая прыжковый механизм транспорта носителей заряда, эффективной подвижности) у оксида тантала при комнатной температуре составляет $10^{-15}\frac{\text{См}^2}{\text{В}*\text{с}}$. С ростом температуры определяемая предлагаемым способом подвижность возрастает по аррениусовскому закону с характерной энергией активации, составляющей десятые доли электрон-Вольта. При увеличении напряженности приложенного после прекращения оптического возбуждения электрического поля, как и следовало ожидать в условиях прыжкового транспорта в неупорядоченной системе с сильной локализации носителей заряда, подвижность носителей заряда обнаруживает начальное падение.

В пользу правомерности предлагаемой методики свидетельствуют следующие, полученные независимыми методами, результаты. Во-первых, та же по порядку оценка подвижности, произведенная на основании данных о кинетике восстановления электретной разности потенциала. Во-вторых, аналогичное отмеченному выше, поведение с изменением напряженности электрического поля изменение вероятности критического прыжка, установленное на основе данных о временной зависимости тока на постоянном сигнале.

Наличие в частотной зависимости $tg\ \delta$ пленочных диэлектрических материалов максимума может сигнализировать о высоком уровне потенциально опасной структурной неоднородности. Как показали проведенные на партиях опытных образцов металлооксидных структур эксперименты, между регистрируемым на этапе изготовления структур характером частотной зависимости $tg\ \delta$ и поведением тока утечки емкостных элементов при длительном электротепловом нагружении существует статистически значимая корреляция. Если у основной массы образцов со слабой, монотонной частотной зависимостью $tg\ \delta$ ток утечки со временем падает, то у образцов с максимумом в этой зависимости при длительном электрическом нагружении с большой вероятностью наблюдается рост тока утечки, что ведет к преждевременному отказу.

Другая, прошедшая экспериментальную проверку возможность выявления потенциально опасной структурной неоднородности, причем более оперативно, нежели регистрация частотной зависимости $tg\ \delta$, состоит в его измерении на фиксированной частоте переменного напряжения и при приложении наряду с ним постоянного напряжения, величина которого находится в области падение проводимости с увеличением напряженности постоянного электрического поля. Сигналом для отбраковки потенциально ненадежных образцов здесь может служить значительно повышенное по сравнению со средним по выборке уменьшение $tg\ \delta$ при приложении к металлооксидной структуре. постоянного смещения.

М. В. Шестаков
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАНОСТЕРЖНЕЙ ОКСИДА ЦИНКА

Аннотация. Оксид цинка является перспективным материалом для создания оптоэлектронных устройств. Цель работы – синтез наностержней оксида цинка и измерение его удельного сопротивления. Методом термического роста из солевой матрицы были синтезированы наностержни оксида цинка, активированного литием, железом и никелем. Синтезированные наностержни были спрессованы в таблетки для проведения электрофизических измерений, которые показали, что все таблетки обладают удельным сопротивлением порядка 1 МОм·см.
Ключевые слова: оксид цинка, наностержни, железо, никель, литий, электрофизическое измерение сопротивления.
Для цитирования: Шестаков М. В. Измерение электрического сопротивления наностержней оксида цинка // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

M. V. Shestakov
Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

MEASUREMENT OF ELECTRICAL RESISTANCE OF ZINC OXIDE NANORODS

Abstract. Zinc oxide is a promising material for creating optoelectronic devices. The aim of this study was to synthesize zinc oxide nanorods and measure their resistivity. Using thermal growth from a salt matrix, zinc oxide nanorods doped with lithium, iron, and nickel were synthesized. The synthesized nanorods were pressed into pellets for electrical measurements, which showed that all pellets had a resistivity of about 1 MΩ·cm.
Keywords: zinc oxide, nanorods, iron, nickel, lithium, electrophysical measurement of resistance.
For citation: Shestakov M. V. Measurement of electrical resistance of zinc oxide nanorods // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

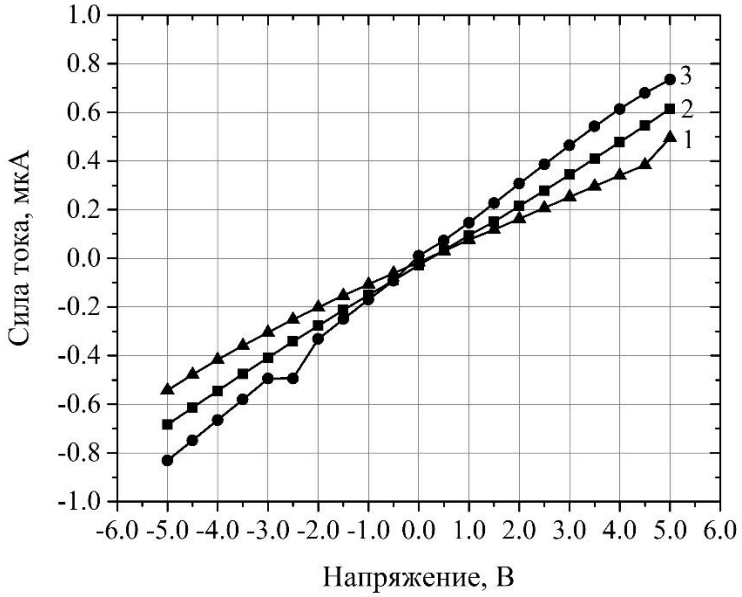
Благодаря широкой запрещённой зоне и высокой энергии связи экситона вюртцитный оксид цинка является перспективным материалом для различных оптоэлектрических устройств. С целью модификации оптических, электрических и магнитных свойств оксида цинка, часто проводят его активацию при помощи различных химических элементов, например, ионов лантанидов, металлов переходной группы и лития. Целью данной работы являлось измерение и оценка величины удельного электрического сопротивления таблеток из наностержней оксида цинка, активированных литием (ZnO:Li), литием и железом (ZnO:Li, Fe), а также литием и никелем (ZnO:Li, Ni).

Наностержни оксида цинка были синтезированы методом термического роста из солевых матриц. На первой стадии синтеза были получены прекурсоры – чистый гидроксокарбонат цинка, а также активированные ионами Fe^{3+} и Ni^{2+}. Гидроксокарбонаты синтезировали методом соосаждения гидрокарбонатом аммония из водных растворов нитратов соответствующих химических элементов. После синтеза, полученные гидроксокарбонаты были вы-

сушены в лабораторном сублиматоре. Затем каждый гидроксокарбонат смешивался с хлоридом натрия и карбонатом лития в приблизительном мольном соотношении 1:18:2, размалывался в планетарной мельнице в течении одного часа. Полученную смесь помещали в корундовый тигель и подвергали отжигу в муфельной печи в течение 2 часов при температуре 700 °С. Затем синтезированные порошки ZnO:Li, ZnO:Li, Fe и ZnO:Li, Ni отмывали от солевой матрицы хлорида натрия дистилированной водой на воронке Бюхнера.

Синтезированные порошки были исследованы методом сканирующей электронной микроскопии, которая показала, что они все состоят из наностержней длиной до нескольких микрометров и диаметром около 100 нм. Кроме того, синтезированные порошки были исследованы методом рентгенофазового анализа. Его результаты показали, что ZnO:Li не содержит примесей, а ZnO:Li, Fe и ZnO:Li, Ni содержит незначительное количество Li_2ZnSiO_4. Присутствие фазы Li_2ZnSiO_4 можно объяснить намолом с силиконовой резины, которая использовалась как уплотнитель между стаканом и крышкой во время помола в планетарной мельнице.

Перед проведением электрофизических измерений удельного сопротивления порошки ZnO:Li, ZnO:Li, Fe и ZnO:Li, Ni были спрессованы в таблетки толщиной около 1 мм. Затем, к обеим сторонам таблеток были прикпреплены медные провода с площадью сечения 1 мм^2 с помощью токопроводящей серебряной пасты. Электрофизические измерения проводили с помощью источника-измерителя Keithley model 238. Результаты проведённых измерений показаны на рисунке.



Электрофизическое измерение сопротивления таблеток из наностержней ZnO: Li (1), ZnO:Li, Fe (2) и ZnO:Li, Ni (3)

Таблетки из наностержней ZnO: Li, ZnO: Li, Fe и ZnO: Li, Ni демонстрировали линейные вольтамперные характеристики, что соответствовало закону Ома. Все вольтамперные характеристики были записаны в диапазоне напряжений от -5,0 до +5,0 В с шагом 0,5 В, а измеренные значения силы тока лежали в пределах от -0,9 до 0,8 мкА. Вычисленные значения удельных электрических сопротивлений таблеток ZnO:Li, ZnO:Li, Fe и ZnO:Li, Ni составили 1,0, 0,8 и 0,7 Ом·см.

Наностержни ZnO:Li, ZnO:Li, Fe и ZnO:Li, Ni были синтезированы методом термического роста из солевых матриц. Наностержни ZnO:Li, Fe и ZnO:Li, Ni содержали небольшое количество примесной фазы фазы Li_2ZnSiO_4. Электрофизические измерения показали, что вольтамперные характеристики всех таблеток из наностержней соотвествовали линейному закону Ома, а удельные электрические сопротивления соответствовали значениям 1,0, 0,8 и 0,7 Ом·см для ZnO:Li, ZnO:Li, Fe и ZnO:Li, Ni.

И. А. Южаков, Б. З. Гармаев, Э. Ч. Хартаева, А. В. Номоев
Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОЧАСТИЦ КАРБОНИЛЬНОГО ЖЕЛЕЗА С СИЛИКОНОВОЙ МАТРИЦЕЙ В ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТАХ

Аннотация. Методами ИК-спектроскопии, микроволновых и реологических измерений исследовано взаимодействие микрочастиц карбонильного железа марок Р10, Р20 и Р100Ф-2 с силиконовой матрицей SilcoTin 25 в высоконаполненных композитах. Показано, что новые ковалентные связи не образуются, а межфазное взаимодействие усиливается при увеличении удельной поверхности наполнителя. Расчёт входного импеданса выявил, что граничные условия существенно меняют картину согласования: на металлической подложке возможны частотные области улучшенного согласования.
Ключевые слова: карбонильное железо, силиконовый композит, SilcoTin 25, ИК-спектроскопия, межфазное взаимодействие, нормированный импеданс, металлическая подложка, СВЧ-поглощение.
Для цитирования*:* Южаков И. А., Гармаев Б. З., Хартаева Э. Ч., Номоев А. В. Особенности взаимодействия микрочастиц карбонильного железа с силиконовой матрицей в высоконаполненных композитах // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

I. A. Yuzhakov, B. Z. Garmaev, E. Ch. Khartaeva, A. V. Nomoev
Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

FEATURES OF CARBONYL IRON MICROPARTICLE INTERACTION WITH THE SILICONE MATRIX IN HIGHLY FILLED COMPOSITES

Abstract. The interaction of carbonyl iron microparticles of grades P10, P20 and P100F-2 with a SilcoTin 25 silicone matrix in highly filled composites is studied by FTIR spectroscopy, microwave and rheological measurements. It is shown that no new covalent bonds are formed, while interfacial interaction becomes more pronounced with increasing specific surface area of the filler. Calculation of the input impedance reveals that boundary conditions significantly modify the matching behavior: frequency regions of improved matching are possible on a metal substrate.
Keywords*:* carbonyl iron, silicone composite, SilcoTin 25, FTIR spectroscopy, interfacial interaction, normalized impedance, metal backing, microwave absorption.
For citation*:* Yuzhakov I. A., Garmaev B. Z., Khartaeva E. Ch., Nomoev A. V. Features of carbonyl iron microparticle interaction with the silicone matrix in highly filled composites // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Высоконаполненные композиты на основе карбонильного железа (CIP) и силиконовых матриц применяются как радиопоглощающие материалы для обеспечения электромагнитной совместимости. Их эффективность определяется не только магнитными потерями, но также морфологией частиц, диэлектрическими компонентами и импедансным согласованием слоя. Ранее для системы SilcoTin 25/CIP показано, что наиболее высокие коэффициенты поглощения достигаются на микропорошке Р10 при сохранении слабой проводимости образцов, а введение нанопорошка SiO_2 (таркосил) немонотонно

перераспределяет баланс отражения, прохождения и поглощения. Однако остаётся неясным, связаны ли эти изменения с образованием новых химических связей на границе полимер – наполнитель или с физической адсорбцией и иммобилизацией силоксановых цепей. Кроме того, нормированный импеданс бесконечной среды не учитывает конечную толщину и граничные условия реального слоя.

Цель работы – на основании ИК-спектроскопии, микроволновых и реологических данных выявить особенности взаимодействия CIP с SilcoTin 25 и оценить влияние этого взаимодействия на импедансное согласование, включая расчёт входного импеданса слоя в воздухе и на металлической поверхности.

Исследовали отверждённый SilcoTin 25, силикон с SiO_2, микропорошки CIP марок P10, P20 и P100Ф-2, а также композиты с таркосилом 1, 2 и 3 мас.%. ИК-спектры регистрировали методом НПВО на алмазной и германиевой приставках. Для микроволновой части использовали опубликованные данные, полученные методом прохождения/отражения в коаксиальной ячейке для свободностоящего слоя толщиной 2 мм.

ИК-спектр отверждённого силикона соответствует полидиметилсилоксановой матрице: полосы 2962 и 2905 $см^{-1}$ относятся к валентным колебаниям метильных групп, 1412 и 1258 $см^{-1}$ – к деформационным, 1007 $см^{-1}$ с плечом 1067 $см^{-1}$ - к асимметричным валентным колебаниям Si–O–Si, сигналы 863 и 786 $см^{-1}$ – к колебаниям Si–C и симметричным Si–O–Si. Для SiO_2 характерны полосы 1087 и 808 $см^{-1}$. На спектрах исходных порошков P10, P20 и P100Ф-2 выраженные сигналы отсутствуют, что указывает на отсутствие значимого ИК-активного загрязнения. Спектры силикона и силикона с 3 мас.% SiO_2 практически идентичны: таркосил не формирует самостоятельного ИК-признака на фоне матрицы, а его полосы перекрываются с областью Si–O–Si. Для композитов на основе P10 спектры не отличаются от спектра матрицы; для P20 наблюдается слабое уширение полос Si–O–Si в низкочастотную область; для P100Ф-2 уширение наиболее выражено, а пики около 1016 и 791 $см^{-1}$ смещаются примерно на 3 $см^{-1}$, тогда как полосы CH_3-групп положения не меняют. Это указывает, что взаимодействие затрагивает преимущественно кремний-кислородный скелет полимера. Главный вывод ИК-анализа: новых ковалентных связей не обнаружено, а наблюдаемые изменения связаны с физической адсорбцией и иммобилизацией фрагментов силоксановой цепи. По выраженности изменений группы располагаются в ряд P10 < P20 < P100Ф-2, что согласуется с ростом удельной поверхности наполнителя.

Расчёт нормированного импеданса показал, что для SiO_2-модифицированных композитов модуль импеданса эффективной среды существенно меньше единицы, что соответствует неполному согласованию со свободным пространством. Учёт конечной толщины 2 мм изменяет входной импеданс, но для свободностоящего слоя сохраняет проблему отражения и прохождения. Теоретический расчёт для слоя на металлической поверхности показывает, что отсутствие канала прохождения и интерференционный характер входного импеданса могут улучшать согласование в отдельных частотных областях: на 3 ГГц состав с 3 мас.% SiO_2 согласован заметно лучше, чем с 1–2 мас.%, а на 6 ГГц составы с 1–2 мас.% SiO_2 дают расчётные отражательные потери порядка −14…−15 дБ.

Сопоставление ИК-данных, реологии и СВЧ-отклика показывает, что изменение электродинамических характеристик системы SilcoTin 25/P-10 при введении таркосила не следует объяснять появлением новой химической сетки. Реологические данные указывают на рост динамических модулей сдвига, наиболее выраженный при 1–2 мас.% SiO_2, что свидетельствует о структурировании материала, но не является доказательством ковалентных межфазных связей. С учётом ИК-анализа такой рост корректнее связывать с физической сетью наполнителей и иммобилизацией фрагментов силиконовой цепи. Такая перестройка может повышать вклад диэлектрической проницаемости; если он не компенсируется ростом магнитной проницаемости, нормированный импеданс уменьшается, а отражение возрастает.

Таким образом, ИК-спектроскопия подтверждает, что SilcoTin 25 соответствует полидиметилсилоксановой матрице, а исходные микропорошки CIP не содержат выраженных ИК-активных загрязнений. Для Р10 межфазные спектральные изменения не выявлены, для Р20 они слабые, для Р100Ф-2 – наиболее выраженные, что указывает на усиление физико-химического взаимодействия полимер–железо при увеличении удельной поверхности. Новые ковалентные связи не обнаружены, поэтому рост модулей сдвига трактуется как физическое структурирование и связанный полимерный слой. Расчёт входного импеданса показал, что для практического применения высоконаполненных SilcoTin 25/CIP-композитов необходимо отдельно оптимизировать состав, толщину и тип подложки, поскольку металлическая поверхность может создавать частотные области улучшенного согласования, отсутствующие у свободностоящего слоя.

Работа выполнена в рамках государственного задания FWSF-2024-0013 «Разработка физических основ создания функциональных композиционных наноструктур и материалов и построения моделей фазовых диаграмм многокомпонентных систем», регистрационный номер 124041100130-3.

А. С. Ященко, С. А. Варнаков, С. В. Кривальцевич
Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

ТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОЧВЕННЫЕ КАРТЫ КАК ИСТОЧНИК ПЕРВИЧНЫХ ДАННЫХ О ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Аннотация. Приведены результаты анализа информационных ресурсов на предмет получения данных о гранулометрическом составе почв. Выяснено, что данные о гранулометрическом составе почв, предоставляемые отечественными информационными ресурсами, отличаются большей точностью о гранулометрическом составе почв, относящихся к территории Омской области. Определены точки отбора проб для проведения измерений диэлектрической проницаемости в лабораторных условиях.
Ключевые слова*:* диэлектрическая проницаемость, подстилающая поверхность.
Для цитирования*:* Ященко А. С. Варнаков С. А., Кривальцевич С. В. Тематические почвенные карты как источник первичных данных о диэлектрической проницаемости // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. S. Yashchenko, S. A. Varnakov, S. V. Krivaltsevich
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

THEMATIC SOIL MAPS AS A SOURCE OF PRIMARY DATA ON DIELECTRIC PERMITTIVITY

Abstract. The paper presents the results of the analysis of information resources regarding data on soil texture. It was found that data on texture of soils in the Omsk Region provided by domestic information resources are more accurate. Sampling points were selected for laboratory measurements of dielectric permittivity.
Keywords*:* dielectric permittivity, underlaying surface.
For citation*:* Yashchenko A. S., Varnakov S. A., Krivaltsevich S. V. Thematic soil maps as a source of primary data on dielectric permittivity // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Данные о комплексной диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности востребованы во многих отраслях науки и техники. В частности, достоверные значения комплексной диэлектрической проницаемости используются при решении практических задач радиосвязи: оценке направленных и импедансных характеристик приземных излучателей, прогнозировании распространения земной волны и состояния нижней границы волновода «поверхность Земли – ионосфера» и т.д.. Значения комплексной диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности определяется, в основном, гранулометрическим (механическим) составом, объёмной влажностью и термодинамической температурой, и, в значительно меньшей степени, от содержания органической компоненты (гумуса) и растворимых в воде солей. Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости почв от влажности обусловлена значительным отличием в значениях диэлектрической проницаемости жидкой воды и веществ, слагающих

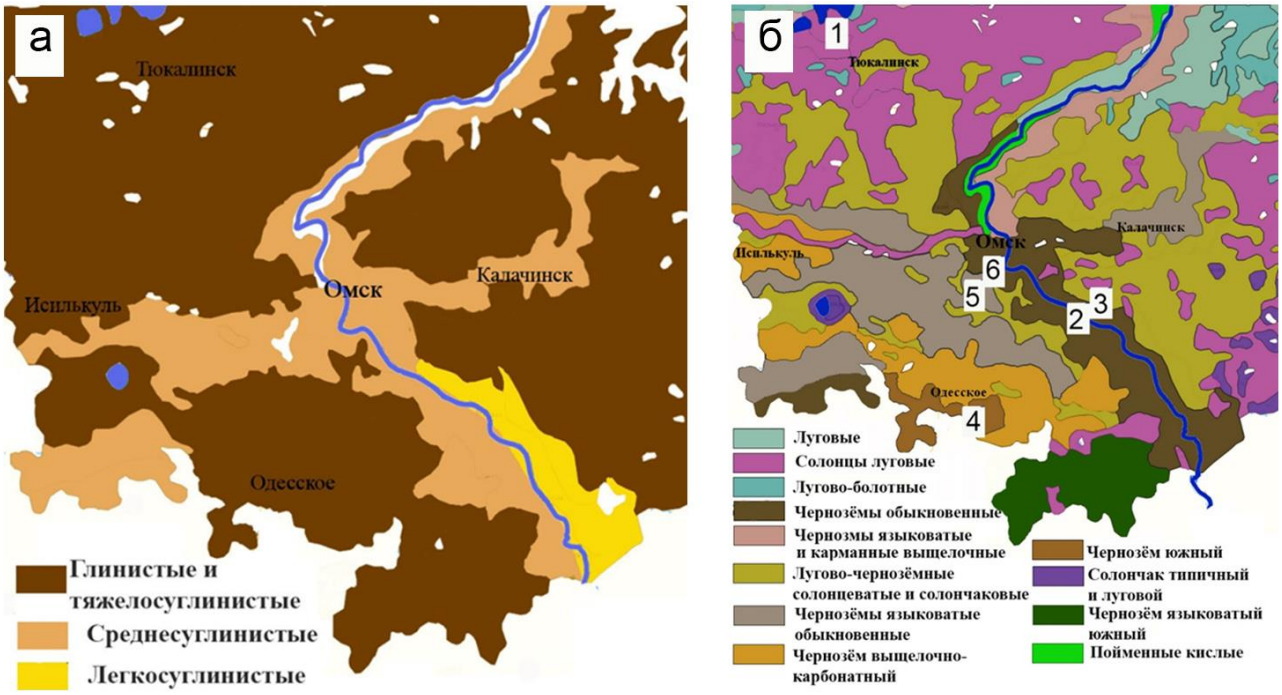
минеральный скелет. В результате взаимодействия полярных молекул воды с поверхностью частиц минерального скелета почвы изменяется подвижность почвенной влаги. В следствие чего вода, распределённая в почве, разделяется на две основные формы: свободную и связанную. Свободная вода сохраняет возможность свободно перемещаться под действием гравитации и капиллярных эффектов, а связанная теряет её. Изменение подвижности почвенной влаги приводит к изменению физических и, в частности, диэлектрических свойств. С ростом содержания физической глины (минеральных частиц размером меньше 0,01 мм в отечественной классификации) увеличивается удельная поверхность почвы, а, следовательно, доля связанной воды, что определяет влияние гранулометрического состава на КДП почв и грунтов. На данный момент создан ряд диэлектрических моделей влажных почв, валидных в определённом диапазоне частот, влажностей, температур и гранулометрического состава. Крайние значения диапазонов определяются эмпирическими данными, использовавшимися при создании модели.

Изначально, необходимость создания диэлектрической модели влажных почв возникла в рамках решения обратной задачи дистанционного микроволнового радиометрического зондирования в дециметровом и сантиметровом диапазоне волн. Для определения влажности почвы с приемлемой точностью из данных дистанционных измерений необходимы данные о гранулометрическом составе почв (как одного из входных параметров модели комплексной диэлектрической проницаемости влажных почв) в пределах слоя, соответствующего глубине зондирования радиометра. Этим критериям соответствует отечественный ресурс «Почвенная карта России URL: https://soil-db.ru/map», предоставляющий информацию о типе почв в пределах поверхностного слоя толщиной около 30 см. Ресурс создан на основании оцифрованной карты РСФСР Почвенного института им. В.В. Докучаева от 1988 г. Также известен зарубежный геоинформационный продукт «SOILGRIDS URL: https://soilgrids.org/» в котором приведены данные о гранулометрическом составе в пределах поверхностного слоя почв толщиной до 2 метров. Геоинформационный продукт представляет собой цифровую модель почвы, созданную на основе данных, полученных контактными методами (непосредственным отбором проб), с привлечением параметров, полученных с помощью технологий дистанционного зондирования Земли. Информация, представленная в указанных ресурсах, может быть использована, при определённых условиях, в оценке гранулометрического состава, а, следовательно, диэлектрических характеристик подстилающей поверхности.

Как показал анализ данных о гранулометрическом составе почв, предоставленный в «SOILGRIDS URL: https://soilgrids.org/», несмотря на высокое пространственное разрешение полученных тематических карт диэлектрической проницаемости, сгенерированных на основании зарубежных данных и моделей, их валидность для территории России в целом и Омской области в частности вызывает сомнение. По этой причине при определении координат точек отбора проб мы руководствовались данными предоставленными отечественными информационными системами. Объяснением этому в равной мере могут служить как отличия в критерии «глина» согласно отечественной и зарубежной классификации, так и отсутствие данных прямых измерений гранулометрического состава согласно стандарту USDA. Согласно данным, приведённым в отечественных источниках почвы юга Омской области, относятся, преимущественно, к глинистому и тяжелосуглинистому виду (см. рис. *а*). Среднесуглинистые почвы расположены вблизи существующих рек Иртыш и Омь, а также в Камышловском логе (русле исчезнувшей реки Камышловки). Легкосуглинистые почвы присутствуют на правом берегу Иртыша на юго-востоке Омской области.

Поскольку, как уже отмечалось ранее, диэлектрические характеристики почв определяются наличием солей и органической компоненты, при выборе мест отбора проб так же учитывался преимущественный тип почвообразования. В итоге нами были опре-

делены координаты участков поверхности, представленные солонцами луговыми и разными видами чернозёмов, а также относящиеся к легким, средним и тяжёлым суглинкам (см. рис. *б*).



Пространственное распределение видов почв согласно отечественной класс ификации (а), карта почвенных комплексов в пределах территории Омской области (б). Цифрами обозначены места отбора проб

В результате проведённых работ был выполнен анализ данных о гранулометрическом составе почв в пределах территории Омской области и определено местоположение участков для отбора проб. Получены первичные данные о диэлько-влажностных зависимостях одного из образцов, относящегося к тяжелому суглинку комплекса солонца лугового. В дальнейшем, по мере накопления данных о КДП почвенных образцов, будет разработана усовершенствованная диэлектрическая модель влажных почв валидная в пределах территории Омской области.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Омской области в рамках гранта РНФ № 26-12-20019.

Н. Е. Агарков
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

К ВОПРОСУ О ВЕЛИЧИНЕ ПАРАЗИТНОЙ ЕМКОСТИ МЕЖДУ ПРЯМЫМ И ОБРАТНЫМ ПРОТЯЖЕННЫМИ ПРОВОДНИКАМИ СОГЛАСУЮЩЕЙ ЦЕПИ МАЛОГАБАРИТНОГО РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО СОГЛАСУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА КВ-ДИАПАЗОНА

Аннотация. Излучаемая мощность (эффективность) систем «укороченная антенна – согласующее устройство» КВ-диапазона во многом зависит от импеданса паразитной емкости между протяженными прямым и обратным проводниками согласующей цепи. В работе приводятся результаты измерения емкости между этими проводниками макета согласующей цепи, содержащей в обратном слое двухсторонней печатной платы многочисленные проводники управления согласующей цепью, пересекающие высокочастотные прямой и обратный проводники цепи. Выполнено сравнение частотной зависимости емкости между прямым и обратным проводником макета согласующей цепи в режиме холостого хода относительно двух сконструированных односторонних печатных плат с аналогичным макету расположением прямого и обратного проводников.

Ключевые слова: антенное согласующее устройство, резонансное согласование, дискретно коммутируемые элементы, протяженные проводники цепи, емкость между проводниками, малогабаритное устройство, печатные платы, КВ-диапазон.
Для цитирования: Агарков Н. Е. К вопросу о величине паразитной емкости между прямым и обратным протяженными проводниками согласующей цепи малогабаритного резонансного перестраиваемого согласующего устройства КВ-диапазона // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

N. E. Agarkov
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

TO THE QUESTION OF PARASITIC CAPACITANCE BETWEEN THE EXTENDED FORWARD AND GROUND CONDUCTORS OF THE MATCHING CIRCUIT OF A COMPACT RESONANT HF ANTENNA TUNER

Abstract. The radiated power (efficiency) of HF systems «shortened antenna-matching device» largely depends on the impedance of the parasitic capacitance between the extended forward and ground conductors of the matching network. This paper presents the results of measuring the capacitance between the forward and ground conductors of a matching network prototype, containing numerous matching network control conductors in the bottom layer of a double-sided

printed circuit board; the conductors intersect the high-frequency forward and ground conductors. The frequency dependence of the capacitance between the forward and ground conductors of the matching network prototype in idle mode is compared with two designed single-sided printed circuit boards with the same forward and ground conductor arrangement.
Keywords: antenna tuner, resonant matching, discretely switched elements, extended circuit conductors, capacitance, compact matched circuit, printed circuit boards, HF band.
For citation: Agarkov N. E. To the question of parasitic capacitance between the extended forward and ground conductors of the matching circuit of a compact resonant HF antenna tuner // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В составе современных носимых и возимых КВ-радиостанций малой мощности (10…200 Вт) все более широко применяются укороченные относительно длины рабочей волны резонансные проволочные антенны (штыри, «Наклонные лучи», «Вертикальные полуромбы», диполи). Теоретически наиболее эффективным способом согласования импеданса подобных антенн с номинальным выходным сопротивлением приемопередатчика является способ резонансного согласования, обеспечиваемый с помощью встроенного в приемопередатчик перестраиваемого согласующего устройства, имеющего до 10…14 дискретных элементов одного типа (индуктивных, емкостных, трансформаторов сопротивления).

Ввиду крайне ограниченного объема приемопередатчика и жестких требований к его массе, рассматриваемые согласующие устройства выполняются на основе печатной платы. Значение tgδ подложек применяемых плат находится в пределах 0,004…0,02. При этом необходимость размещения большого количества дискретно коммутируемых звеньев приводит к удлинению прямого и обратного проводника таких устройств вплоть до 0,5–1,0 м (с учетом длин внутренних контактов реле индуктивных звеньев, располагаемых последовательно). Опуская в сторону сложность точного расчета величины емкости между такими протяженными проводниками сложной формы (рис. 1), отметим, что на практике величина паразитной емкости между прямым и обратным проводником согласующей цепи малогабаритного согласующего устройства может достигать величины в несколько десятков пикофарад и более (что сравнимо с емкостью самих укороченных антенн электрического типа). При этом известные формулы для расчета емкости линий передачи (чем и являются, по-сути, протяженные высокочастотные прямой и обратный проводники согласующей цепи), в ряде случаев обеспечивают погрешность более 100% в меньшую сторону относительно измеряемых величин данной паразитной емкости согласующей цепи.

Рис. 1. *Упрощенная топология прямого и обратного печатных проводников макета согласующей цепи с учетом проводников системы управления в обратном слое печатной платы согласующей цепи с указанными местами подключения векторного анализатора цепей (1,2)*

Для выявления причины высоких значений емкости между протяженными высокочастотными проводниками согласующей цепи был выполнен ряд измерений данной емкости у трех печатных плат, одна из которых являлась законченным устройством – макетом согласующей цепи (рис. 1), а вторая и третья были однослойными и сконструированы отдельно. На второй плате топология проводников макета согласующей цепи повторялась с помощью расположения медных пластин той же конфигурации, что и у макета цепи. На третьей плате топология проводников макета согласующей цепи повторялась с помощью тонкого провода ПЭТВ-2 1,0 мм. Для второй и третьей плат имитация расположения на обратной стороне платы проводников системы управления согласующей цепью реализовывалась с помощью закрепления на ней большой металлической пластины. Результаты всех проведенных измерений емкости отображены ниже на рис. 2.

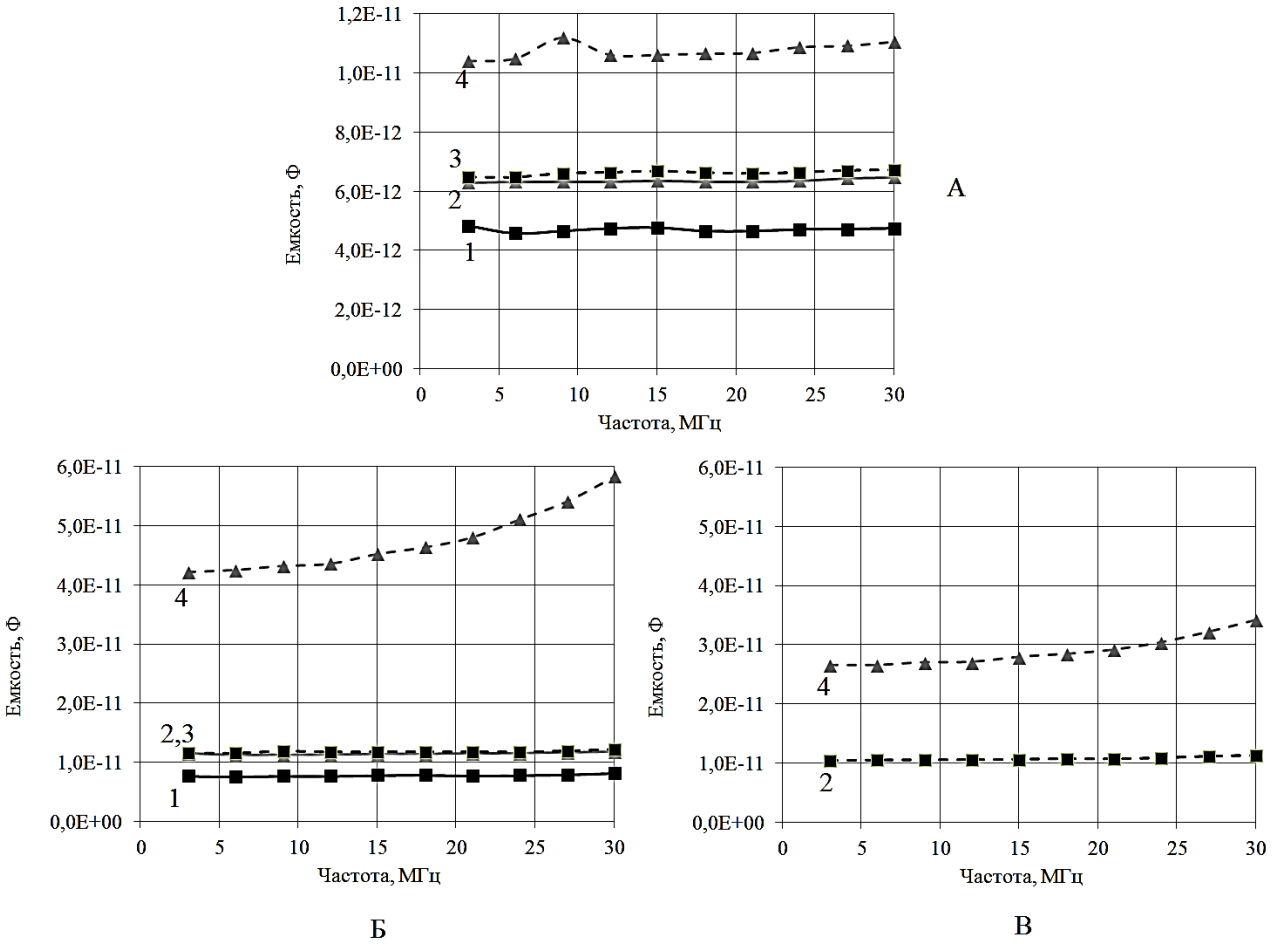


Рис. 2. *Графики частотной зависимости емкости уединенного прямого проводника согласующей цепи при отсутствии дополнительного слоя под топологией цепи (1), уединенного прямого проводника при расположении металлической пластины на обратной стороне подложки печатной платы или измерении макета АнСУ, где такие проводники уже имеются (2), емкость между прямым и обратным проводником при отсутствии дополнительного слоя под топологией цепи (3) и емкость между прямым и обратным проводником при расположении металлической пластины на обратной стороне подложки печатной платы или измерении макета АнСУ, где такие проводники уже имеются (4) для топологии проводников, повторяющих макет согласующей цепи и выполненных из провода ПЭТВ-2 1,0 мм (А), для топологии проводников, повторяющих макет согласующей цепи и выполненных из медных пластин (Б) и самого макета согласующей цепи (В)*

Анализ графиков, показанных на рис. 2, свидетельствует о том, что определяющую роль в величине емкости между прямым и обратным высокочастотными проводниками согласующей цепи играет наличие проводников других систем согласующей цепи (или

приемопередатчика) в смежных слоях платы, значительно повышающих связь между прямым и обратным высокочастотными проводниками цепи. При этом также видно, что выполнение протяженных проводников согласующей цепи из провода ПЭТВ-2 1,0 мм (обладающего большей индуктивностью) позволяет в 4…5 раз снизить величину рассматриваемой паразитной емкости. Кроме этого необходимо отметить, что система из отдельных проводников системы управления согласующей цепью, пересекающих протяженные высокочастотные проводники цепи в смежных слоях, оказывает в 1,5…2 раза меньшее влияние на рост рассматриваемой паразитной емкости, чем расположение монолитной большой металлической пластины на том же расстоянии (1,5 мм) от протяженных прямого и обратного проводников согласующей цепи.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Г. А. Акентьев
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ТРОПОСФЕРНОЙ РАДИОСВЯЗИ В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Аннотация. Проведен энергетический расчет каналов дальней тропосферной радиосвязи, находящихся в пределах акватории Северного морского пути. На основе полученных данных выявлены возможности применения систем тропосферной радиосвязи в исследуемых условиях.
***Ключевые слова**:* Арктическая зона Российской Федерации, Северный морской путь, тропосферная радиосвязь.
***Для цитирования**:* Акентьев Г. А. О возможностях применения систем тропосферной радиосвязи в акватории Северного морского пути // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

G. A. Akentev
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

ABOUT THE POSSIBILITIES OF USING TROPOSPHERIC RADIO COMMUNICATIONS SYSTEMS IN THE WATERS OF THE NORTHERN SEA ROUTE

Abstract. The study presents an energy calculation for long-range tropospheric radio communication channels located within the Northern Sea Route. The obtained data were used to determine the feasibility of using tropospheric radio communication systems in the studied conditions.
***Keywords**:* Arctic zone of the Russian Federation, Northern Sea Route, tropospheric radio communication.
***For citation**:* Akentev G. A. About the possibilities of using tropospheric radio communication systems in the waters of the Northern Sea Route // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Освоение территорий Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) подразумевает, в том числе, и развитие телекоммуникационной инфраструктуры в акватории Северного морского пути (СМП), то есть применение средств радиосвязи. Дальняя (загоризонтная) радиосвязь может обеспечиваться с помощью спутников, тропосферных станций, радиосистем коротковолнового (КВ)-диапазона и других систем связи.

Для судов, проходящих СМП, спутниковая и КВ-радиосвязь являются наиболее востребованными. Однако спутниковая связь становится малоэффективной за Северным полярным кругом, а в ряде случаев – недоступной. КВ-радиосвязь, в свою очередь, обладает практически неограниченной зоной покрытия, но низкой скоростью передачи данных, не более 4…5 Кбит/с. В настоящей работе предлагается рассмотреть возможности

систем тропосферной радиосвязи в качестве резервных каналов связи в акватории СМП.

Для моделирования были выбраны 20 точек вдоль маршрута СМП. Географическое расположение и координаты точек приведены на рис. 1. С помощью цифровых карт для каждой точки были получены среднегодовой показатель преломления над уровнем моря N_0 и вертикальный градиент индекса рефракции радиоволн dN.

***Рис. 1**. Географическое расположение исследуемых точек*

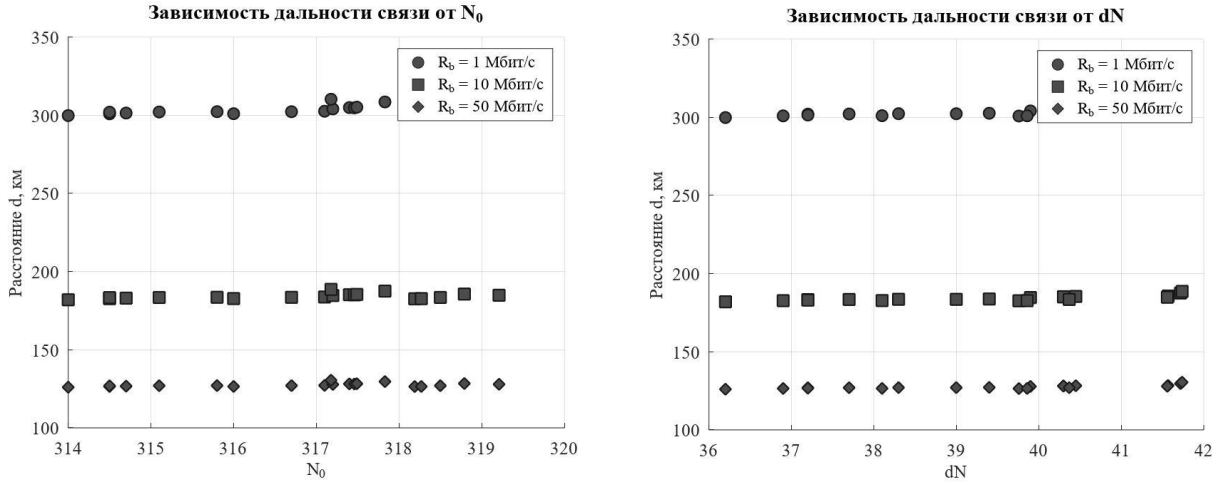
Под точками, приведенными на рис. 1, подразумевалось следующее. Пусть каждая точка – это примерно середина гипотетической радиолинии, то есть в пределах нее находится основная величина диэлектрических неоднородностей (флуктуаций диэлектрической проницаемости воздуха $\mathcal{E}$), которые составляют рассеивающий объем Q. Энергетический расчет дальнего тропосферного распространения проводился по методике, описанной в рекомендации ITU-R P.617-6 от сентября 2025 г. В соответствии с методикой были определены следующие входные параметры:

- рабочая частота $f = 4{,}5$ ГГц;
- усиление передающей и приемной антенн $G_t = G_r = 33$ дБ;
- углы горизонта со стороны передатчика и приемника $\theta_t = \theta_r = 1{,}77$ мрад;
- высоты передающей и приемной антенн $h_t = h_r = 10$ м;
- выходная мощность передающей антенны $P_{TX} = 100$ Вт;
- минимальная чувствительность приемной антенны $P_{RX_{min}} = -172$ дБм/Гц.

Далее для автоматизации и графического представления расчетов в среде Octave-10.3.0 был разработан программный код. Для каждой пары N_0 и dN определены среднегодовые потери передачи в результате тропосферного рассеяния $L_{bs}(p)$ (дБ), не превышаемые для процентов времени $p = 50\%$ для различных значений скорости передачи данных R_b (Мбит/с), и выявлены предельные дальности связи d (км). Результаты программного расчета приведены в виде зависимости предельной дальности связи d (км) от среднегодового показателя преломления над уровнем моря N_0 (а) и вертикального градиента индекса рефракции радиоволн dN (б) на рис. 2.

Проводя анализ данных, представленных на рис. 2, было установлено следующее. Во-первых, при средней скорости передачи данных в 1…10 Мбит/с можно иметь дальность связи 300…170 км соответственно, что сопоставимо с возможностями спутниковых систем. Во-вторых, в рамках рассматриваемых точек вдоль маршрута СМП (рис. 1) зависимость потерь передачи $L_{bs}(p)$ от N_0 и dN минимальна, поэтому для дальнейших расчетов, которые, в том числе, включают в себя исследование зависимости дальности

связи d от процента времени непревышения заданного уровня потерь $p\%$, было определено математическое ожидание от среднегодовых показателей преломления над уровнем моря $E(N_0) = 316{,}8$ и вертикальных градиентов индекса рефракции радиоволн $E(dN) = 39{,}38$ по всей выборке точек вдоль СМП, а также среднеквадратичные отклонения $\sigma(N_0) = 1{,}57$ и $\sigma(dN) = 1{,}73$.



а *б*

***Рис. 2**. Зависимость дальности тропосферной радиосвязи от среднегодового показателя преломления над уровнем моря N_0 (а) и вертикального градиента индекса рефракции радиоволн dN (б) для скоростей передачи данных R_b = 1, 10 и 50 Мбит/с*

Таким образом, результаты, полученные в ходе исследования, показывают не только то, что применение тропосферной радиосвязи в акватории СМП может послужить альтернативой спутникам, но и то, что изменение N_0 и dN вдоль СМП незначительно и дальнейшие исследования можно проводить для их средних или медианных значений.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

А. В. Андросов, М. М. Гаврилов, Ф. А. Егоров, Н. А. Желвицкий
П. В. Куприянов, Ю. А. Орлов, Е. В. Терешкин
АО НПП «Исток им. Шокина», Фрязино, Российская Федерация

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАДИОМЕТРИИ В СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ

***Аннотация*.** Рассматривается адаптация радиометра для обнаружения быстро движущихся объектов. Для исследования созданы рабочая модель радиометра и две математические модели. Первая позволяет оценить требуемую постоянную времени фильтра под заданные параметры движения цели. Вторая, используя реальные данные, генерирует сигналы от движущегося объекта на фоне шумов для отладки алгоритмов обнаружения. В настоящее время на основе разработанных моделей ведется отработка алгоритма выделения движущихся целей.
Ключевые слова: радиометр, пассивная радиолокация, движущийся объект, обнаружение объекта, математическое моделирование, имитационное моделирование, обработка сигналов, алгоритм обнаружения.
Для цитирования: Андросов А. В., Гаврилов М. М., Егоров Ф. А., Желвицкий Н. А., Куприянов П. В., Орлов Ю. А., Терешкин Е. В. Об использовании радиометрии в системах радиолокации // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. V. Androsov, M. M. Gavrilov, F. A. Egorov, N. A. Zhelvitskiy
P. V. Kupriyanov, U. A. Orlov, E. V. Tereshkin
JSC "RPC "Istok" named after Shokin", Fryazino, Russian Federation

ON THE USE OF RADIOMETRY IN RADAR SYSTEMS

Abstract. The paper considers the adaptation of radiometers for detecting fast-moving objects. A working radiometer model and two mathematical models were developed. The first estimates the required filter time constant for specific target motion parameters. The second generates target signals against real noise backgrounds to debug detection algorithms. Currently, detection algorithms are being refined using these models.
Keywords*:* radiometer, passive radar, moving object, object detection, mathematical modeling, simulation modeling, signal processing, detection algorithm.
For citation: Androsov A. V., Gavrilov M. M., Egorov F. A., Zhelvitskiy N. A., Kupriyanov P. V., Orlov U. A., Tereshkin E. V. On the use of radiometry in radar systems // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Радиометрические системы традиционно применяются для наблюдения за объектами по их собственному радиоизлучению. В отличие от активных радиолокационных систем, радиометр не формирует зондирующий сигнал, а регистрирует естественное излучение объекта и окружающего пространства. В связи с этим радиометр можно рассматривать как один из предельных вариантов пассивной радиолокационной системы. Основным преимуществом такого подхода является отсутствие необходимости в формировании и излучении зондирующего сигнала. При этом использование радиометрического метода для обнаружения движущихся объектов связано с рядом особенностей.

Обычные радиометрические системы в основном предназначены для наблюдения за стационарными или медленно изменяющимися объектами. Это связано, в том числе, с большой постоянной времени обработки сигнала. Для повышения отношения сигнал/шум выходной сигнал радиометра обычно подвергается фильтрации и усреднению, что позволяет уменьшить влияние флуктуаций и шумов. Однако при быстром перемещении объекта такой подход может привести к существенному уменьшению амплитуды зарегистрированного сигнала или к его полному сглаживанию. Поэтому для обнаружения быстро движущихся объектов необходимо учитывать не только характеристики самого радиометрического тракта, но и параметры движения объекта.

Для исследования данной задачи была разработана рабочая модель радиометра Ка диапазона частот, позволяющая получать реальные данные для последующей обработки и моделирования. Использование рабочей модели необходимо для того, чтобы математические модели основывались не на идеализированном сигнале, а на характеристиках реально работающей радиометрической системы, включая присутствующие в ней шумы и флуктуации. Полученные данные используются в дальнейшем при моделировании сигналов от движущихся объектов.

В рамках работы разработаны две математические модели. Первая модель предназначена для предварительной оценки влияния постоянной времени выходного фильтра на возможность обнаружения движущегося объекта. При движении объекта относительно радиометра на выходе радиометра формируется сигнал, длительность и форма которого зависят от скорости перемещения объекта, его траектории и характеристик диаграммы направленности. Постоянная времени фильтра определяет, насколько быстро система может реагировать на это изменение.

Модель позволяет связать параметры движения объекта с параметрами фильтра и приблизительно определить, какая постоянная времени может быть использована для его обнаружения. При слишком большой постоянной времени быстрые изменения сигнала сглаживаются, из-за чего амплитуда отклика уменьшается. При уменьшении постоянной времени реакция системы на изменение входного сигнала становится более быстрой, однако при этом возрастает влияние шумов на выходной сигнал. Таким образом, выбор постоянной времени представляет собой компромисс между скоростью реакции радиометра и подавлением шумовой составляющей.

Пример результата работы модели представлен на рис. 1.

Однако одной оценки постоянной времени недостаточно для разработки алгоритма обнаружения. Для дальнейшего исследования разработана вторая математическая модель, использующая реальные данные, полученные с рабочей модели радиометра. Данная модель позволяет воспроизводить сигнал, который мог бы быть зарегистрирован радиометром при движении объекта с заданной высотой и скоростью.

При моделировании учитывается изменение положения объекта относительно диаграммы направленности радиометра. За счет этого можно получить временную зависимость сигнала для различных условий движения, а затем наложить полученный сигнал на реальные шумовые данные. В результате формируется набор данных, максимально приближенный к данным, которые могут быть получены при реальном наблюдении движущегося объекта.

Основным назначением второй модели является отработка алгоритма обнаружения. При использовании только экспериментальных данных невозможно в удобном виде проверить работу алгоритма для большого количества различных условий движения, так как для этого потребовалось бы проводить большое количество экспериментов с объектами, движущимися на различных высотах и скоростях.

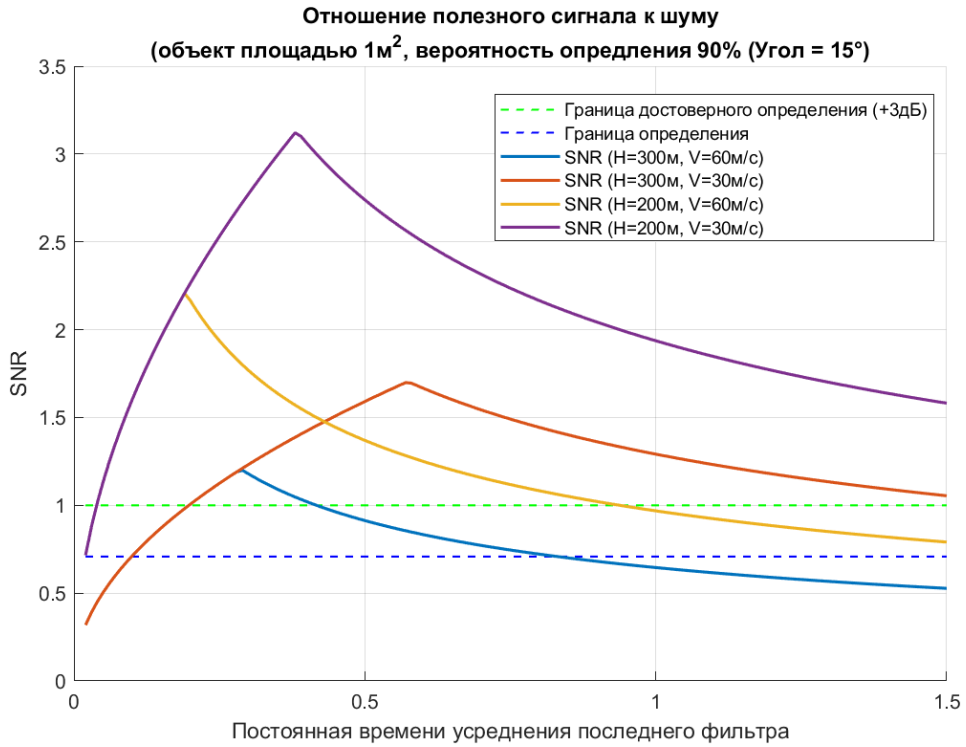


***Рис. 1**. Пример результата работы первой модели*

Результат работы второй модели представлен на рис. 2.

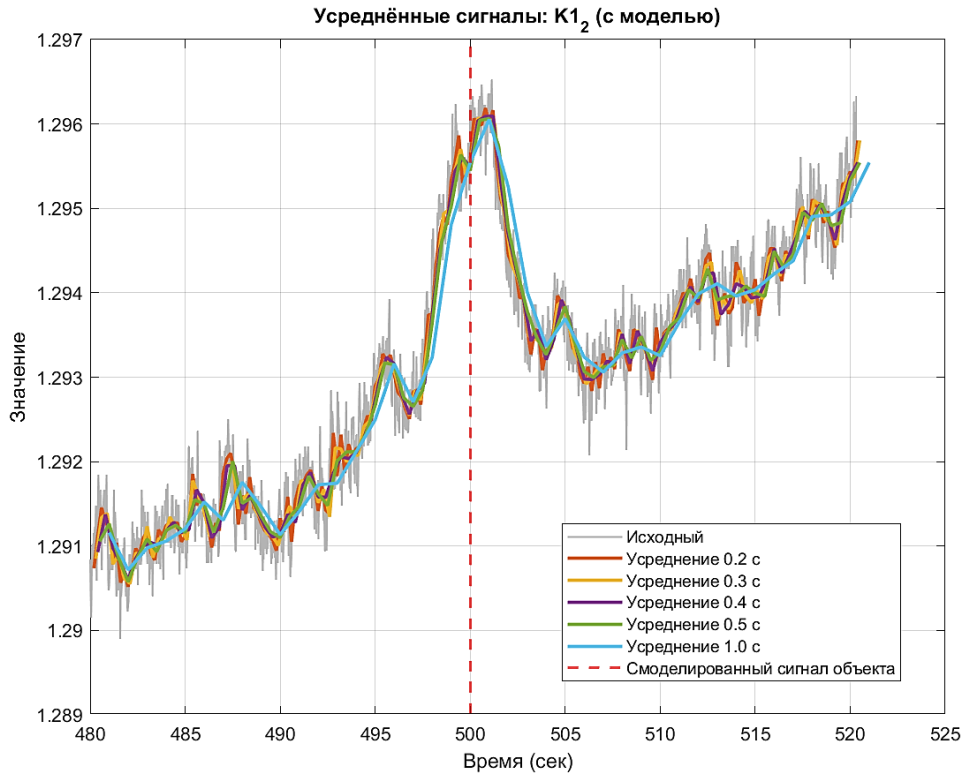


***Рис. 2**. Пример результата работы второй модели*

Таким образом, разработанные модели решают две связанные между собой задачи. Первая позволяет на предварительном этапе определить требования к быстродействию радиометрического тракта и выбрать область значений постоянной времени выходного фильтра. Вторая позволяет исследовать уже непосредственно процесс обнаружения объекта на фоне реальных шумов радиометрической системы. При этом использование

реальных данных в качестве шумовой составляющей позволяет учитывать особенности конкретного радиометрического тракта, которые сложно полностью описать при помощи теоретической модели.

В настоящее время проводится отработка алгоритма обнаружения движущегося объекта с использованием данных, сформированных второй математической моделью. На следующем этапе предполагается оценить возможность обнаружения объектов при различных параметрах движения и определить условия, при которых изменение сигнала может быть достоверно выделено на фоне шумов.

Предложенный подход позволяет рассматривать радиометр не только как средство наблюдения за стационарными объектами, но и как основу для построения пассивной системы обнаружения движущихся объектов. Совместное использование рабочей модели радиометра и математических моделей дает возможность проводить предварительную оценку параметров системы и разрабатывать алгоритмы обработки сигнала без необходимости проведения большого количества натурных экспериментов.

И. Ю. Братухин[1,2], А. Ф. Крячко[1], Г. М. Ревунов[1]
[1]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]АО «Концерн «Автоматика», Москва, Российская Федерация

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Аннотация. Рассмотрены энергетические критерии работоспособности метрологической эффективности средств неразрушающего контроля, на основе которых предложены обобщенные энергетические модели измерительного и внешнего каналов, обеспечивающих подачу и съем энергии зондирующего излучения с объекта контроля. Ограничение по предельной рабочей мощности электромагнитного излучения в СВЧ диапазоне приводит к необходимости повышения энергетической контрастности обнаружения дефекта. Данная особенность требует повышения основных метрологических характеристик средства контроля. Целью работы является исследование обобщенной физической модели взаимодействия зондирующего сигнала с дефектом, выделение информативного сигнала и разработка измерительного канала, обеспечивающего требуемую энергетическую контрастность дефекта на фоне шумов. В результате моделирования формализованы энергетические процессы, происходящие в объекте и средстве контроля, а также условия обеспечения энергетической эффективности.
Ключевые слова*:* дефект, неразрушающий контроль, математическая модель, эффективность.
Для цитирования*:* Братухин И. Ю., Крячко А.Ф., Ревунов Г. М. Энергетические критерии работоспособности и метрологической эффективности средств неразрушающего контроля // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026..

I. Yu. Bratukhin[1,2], A. F. Kryachko[1], G. M. Revunov[1]
[1]St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation
[2]JSC «Concern «Automatics», Moscow, Russian Federation

ENERGY CRITERIA FOR OPERABILITY OF METROLOGICAL EFFICIENCY OF NONDESTRUCTIVE TESTING EQUIPMENT

Abstract. The paper considers energy criteria for operability of metrological efficiency of nondestructive testing means, on the basis of which the authors propose generalized energy models of measuring and external channels, which provide the supply and removal of probing radiation energy from the tested object. Limitation of the maximum operating power of electromagnetic radiation in the microwave range leads to the need to increase the energy contrast of defect detection. This feature requires an increase in the main metrological characteristics of the control device. The purpose of the work is to study the generalized physical model of the interaction of the probing signal with the defect, to select an informative signal and to develop a measuring channel that provides the required energy contrast of the defect against the background of noise. As a result of modeling, energy processes occurring in the object and control means, as well as conditions for ensuring energy efficiency, are formed.
Keywords*:* defect, non-destructive testing, mathematical model, efficiency.
For citation*:* Bratukhin I. Yu., Kryachko A. F., Revunov G. M. Energy criteria for operability of metrological efficiency of nondestructive testing equipment // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Методы неразрушающего контроля, использующие различные диапазоны электромагнитного излучения (СВЧ, оптический и рентгеновский), характеризуются общими физическими признаками, свойствами и физическими моделями, описывающими энергетические процессы взаимодействия зондирующего электромагнитного излучения с объектом контроля (ОК) и с дефектом. Ограничение по рабочей предельной мощности электромагнитного излучения, обусловленное техническими возможностями средств неразрушающего контроля (СНК) в СВЧ, оптическом и рентгеновском диапазонах, приводит к тому, что приходится тщательно исследовать энергетические процессы во время измерения с тем, чтобы повысить энергетическую контрастность обнаружения дефекта.

Подобные исследования необходимы и неизбежны в связи с тем, что повышение энергетической контрастности обнаружения дефекта открывает возможность повышения всех основных метрологических характеристик СНК: реальной чувствительности, точности, локальности контроля, разрешения, надежности контроля и его быстродействия.

Основная сложность создания энергетически эффективных СНК обусловлена двумя техническими причинами: ограничением предельной, рабочей мощности СВЧ генераторов, источников оптического и рентгеновского излучения; конечной относительно невысокой чувствительностью датчиков-преобразователей (Д-П) и приемников СВЧ, оптического и рентгеновского диапазонов.

Стремление построить и применять в СНК приемники гетеродинного типа, как это делается в радиолокации, неизбежно усложнило бы средства контроля, сделало бы их очень восприимчивыми к электромагнитным шумам и помехам различной природы, и, как результат этого, - сделало бы настолько дорогими в производстве и эксплуатации, что их экономическая целесообразность применения стала бы недопустимо низкой.

Поэтому при построении СНК, используемых в качестве зондирующего излучения электромагнитных волн необходимо исследовать энергетические процессы во время взаимодействия зондирующего излучения с ОК и с детектором, и на основе этого находить такие технические решения СНК, которые обеспечили бы надежное обнаружение дефекта.

Целью работы является исследование обобщенной физической модели взаимодействия зондирующего сигнала с дефектом, выделение информативного сигнала и разработка измерительного канала, обеспечивающего требуемую энергетическую контрастность дефекта на фоне шумов.

Анализ необходимо проводить с учетом ограничений – по предельной рабочей мощности зондирующего излучения и по предельной чувствительности приема полезного, информативного электромагнитного сигнала. Технические средства, реализующие физические методы, имеют электронные приемные части, которые могут быть исследованы с использованием общеизвестной теории приема и усиления электрических сигналов.

Введенный в объект контроля зондирующий сигнал любой физической природы (электромагнитный, акустический или тепловой) после взаимодействия с дефектом и последующего преобразования в электрический сигнал должен быть уверенно принят электронным приемником СНК. Приему информативного сигнала мешают появляющиеся в ОК переотражения и шумы, которые также попадают на электронный Д-П приемной части СНК.

Физически последнее объясняется тем, что приемные Д-П СНК одновременно преобразуют в электрические сигналы и информативный сигнал, и все шумовые сигналы, имеющие одинаковую физическую природу, например, акустический сигнал непосредственно от дефекта и все случайно переотражённые акустические сигналы (т.е. акустические шумы).

Кроме того, общий энергетический уровень зондирующего сигнала может быть значительно ослаблен за счет активных потерь как в ОК, так и в узлах СНК, обеспечивающих подвод к ОК и съем полезного сигнала с ОК.

Другая возможная причина снижения энергетического уровня информационного сигнала – это отражение энергии зондирующего излучения от границ ОК при его вводе в ОК и при выходе из ОК. Поэтому обобщенная физическая модель к анализу энергетических процессов, имеющих место во время контроля, должна учитывать и эти важные факты. В основу анализа заложен принцип сохранения энергии в области ОК и внешних каналов (ВК), подводящих к ОК и снимающих энергию с ОК.

Если зондирующий сигнал обладает каким-либо видом модуляции, то подобный сигнал после прохождения бездефектной и дефектной областей ОК в приемной части СНК должен быть подвергнут специальной обработке. В этом случае необходимо говорить о передаче через ОК некоторой информации, потеря которой также зависит от отношения сигнал-шум и рабочей полосы приемной электронной части СНК, включающей и Д-П. Тогда общим энергетическим критерием работоспособности СНК должно стать известное условие Шеннона о существовании максимума информативной емкости любого электронного канала передачи. электронный информативный сигнал будет пропорционален полезной информативной мощности зондирующего излучения после ее взаимодействия с дефектом в ОК, причем независимо от того, какой физический вид имеет зондирующее поле: электромагнитное излучение, акустическое или тепловое поле. Полный электронный шум после Д-П на входе электронной схемы, в свою очередь, пропорционален мощности упомянутых выше зондирующих излучений и полей, но которые по различным причинам трансформировались в канале измерения СНК в мощности шумов.

В этой связи при формировании и исследовании физических моделей всего канала измерения и основных его частей, внешних каналов СНК, все составляющие энергетического процесса целесообразно представить через парциальные удельные потоки энергии. Представление мощностей основных величин через их удельные плотности дает возможность решать задачу анализа измерительного канала в общем виде независимо от длины волны, относительных или абсолютных размеров и формы раскрыва передающих и приемных антенн, а также от размеров и формы дефектов.

Исследование обобщенной энергетической модели измерительного канала проводят для двух характерных случаев: на прохождение зондирующего сигнала дефекта и при работе на отражение зондирующего сигнала от дефекта.

Максимально возможная передача зондирующей энергии из внешнего канала в объект контроля будет при полном согласовании функции излучения ВК и приёмной функции ОК.

Для конкретного целевого и функционального назначения СНК и способа их контакта с ОК, а также в результате анализа ОК и выявления его наиболее информативных параметров формулируют требования к метрологическим характеристикам СНК: информативности, погрешности измерений, чувствительности средств измерений, разрешению средствами НК двух измеряемых параметров в виде некоторой матрицы исходных требований к метрологическим характеристикам СНК.

На основании предварительно проведённых исследований вначале составляется структура средства контроля с учетом топологии, с выявленными качественными и количественными физическими взаимосвязями. Для полученной структуры с учётом всех перечисленных выше исходных данных записывается его математическая модель, наиболее адекватная всей совокупности физических явлений и стохастических процессов, протекающих в работающем датчике-преобразователе.

А. А. Вителюева
Российская академия народного хозяйства и государственной службы
при Президенте Российской Федерации, Смоленск, Российская Федерация

АНАЛИЗ УГРОЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аннотация. Рассматриваются угрозы информационной безопасности в системах дистанционного зондирования Земли. Анализируются основные векторы кибератак на спутниковые системы, каналы связи и наземную инфраструктуру. Особое внимание уделяется требованиям ГОСТ Р 70669-2023 и методике оценки «Роскосмоса» для частных операторов. Предлагаются меры по защите систем дистанционного зондирования Земли: шифрование, системы обнаружения вторжений и аудит уязвимостей.
***Ключевые слова**:* дистанционное зондирование Земли, информационная безопасность, киберугрозы, спутниковые системы, криптографическая защита.
***Для цитирования**:* Вителюева А. А. Анализ угроз информационной безопасности в системах дистанционного зондирования Земли // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. A. Vitelyueva
Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration
Smolensk, Russian Federation

ANALYSIS OF INFORMATION SECURITY THREATS IN EARTH REMOTE SENSING SYSTEMS

***Abstract**. T*he article discusses information security threats in Earth remote sensing systems. The author analyzes the main vectors of cyberattacks on satellite systems, communication channels, and ground infrastructure. Special attention is paid to the requirements of GOST R 70669-2023 and the Roscosmos methodology for evaluating private operators. The paper proposes measures for protecting remote sensing systems, including encryption, intrusion detection systems, and vulnerability audits.
***Keywords**:* remote sensing of the Earth, information security, cyber threats, satellite systems, cryptographic protection.
***For citation**:* Vitelyueva A. A. Analysis of Information Security Threats in Earth Remote Sensing Systems // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Цифровая трансформация всех сфер общественной жизни, активно происходящая в 2025–2026 годах, затронула и космическую отрасль. Современные системы дистанционного зондирования Земли представляют собой сложные цифровые платформы, управляемые программным обеспечением и интегрированные с глобальными наземными сетями. Такая цифровизация, наряду с использованием коммерчески доступных компонентов и повсеместной сетевой интеграцией, привела к значительному расширению поверхности атаки. Спутниковые данные используются для решения широкого спектра задач – от мониторинга природных ресурсов и прогнозирования чрезвычайных ситуаций до обеспечения обороноспособности, и национальной безопасности, что делает системы ДЗЗ привлекательной целью для киберзлоумышленников.

В системах дистанционного зондирования Земли выделяются три основные категории объектов защиты: бортовые системы космического аппарата, каналы связи между спутником и наземными станциями, а также наземная инфраструктура приёма, обработки и хранения данных. ГОСТ Р 70669-2023 «Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Требования к информационной безопасности при хранении» определяет основные виды угроз информационной безопасности: нарушение конфиденциальности (несанкционированный доступ к информации ограниченного доступа), нарушение целостности (несанкционированная модификация или уничтожение данных) и нарушение доступности (блокирование доступа к информационным ресурсам). Объектами защиты в составе архива данных дистанционного зондирования Земли выступают не только сами информационные ресурсы, но и программное обеспечение, программно-технические средства, средства защиты информации и каналы информационного обмена.

Анализ открытых источников позволяет выделить наиболее распространённые векторы кибератак на системы дистанционного зондирования Земли. Во-первых, это атаки на наземные центры управления и приёма данных, которые зачастую защищены хуже, чем сами спутники. Компрометация наземного сегмента позволяет злоумышленникам перехватывать управление спутником, модифицировать командные инструкции или блокировать передачу данных. Во-вторых, это перехват или глушение каналов связи при передаче снимков и телеметрической информации. В-третьих, это атаки на цепочку поставок – внедрение уязвимостей на этапе проектирования и производства спутникового оборудования. Опасность кибероперациий против космических систем заключается также в их низкой стоимости по сравнению с физическим противоспутниковым оружием и сложности идентификации источника атаки.

Отдельного внимания заслуживает рост числа кибератак с использованием технологий искусственного интеллекта и методов социальной инженерии. По данным Центра исследований безопасности при ETH Цюрих, значительная часть кибероперациий против космического сектора приходится на DDoS-атаки, направленные на вывод из строя сайтов и систем управления космических организаций. При этом большинство атакующих оказались хактивистскими группами, что свидетельствует о демократизации угроз – кибероперации в космической сфере перестали быть исключительной прерогативой государственных спецслужб.

Российская нормативная база в области защиты информации систем дистанционного зондирования Земли активно развивается. ГОСТ Р 70669-2023 определяет требования к обеспечению информационной безопасности архива данных дистанционного зондирования Земли, включая необходимость постоянного анализа информационного пространства для выявления угроз, своевременное обнаружение технических проблем, разработку модели угроз и типов нарушителей. Стандарт выделяет внешних и внутренних нарушителей, среди которых специальные службы иностранных государств, террористические группировки, преступные группы, отдельные хакеры, конкурирующие организации и бывшие работники.

Важным шагом в повышении защищённости систем дистанционного зондирования Земли стало введение «Роскосмосом» новой методики оценки частных космических аппаратов, претендующих на государственные контракты по поставке данных дистанционного зондирования Земли. Ключевыми критериями становятся технологическая независимость от иностранных компонентов и защищённость информации. Обязательным условием является соответствие криптографических средств требованиям ФСБ. В случае несоответствия аппарат получает нулевую оценку и не может поставлять данные для государственных нужд. Это решение фактически вводит фильтр, отсекающий частных операторов, чьи спутники не обеспечивают достаточного уровня информационной безопасности.

В качестве приоритетных мер защиты систем дистанционного зондирования Земли рекомендуется шифрование каналов передачи данных и команд управления с использованием средств криптографической защиты, сертифицированных ФСБ; внедрение систем обнаружения вторжений на наземных комплексах приёма и обработки данных; регулярный аудит уязвимостей бортового и наземного программного обеспечения; разработка и внедрение процедур безопасного обновления прошивок спутников; а также создание резервных наземных центров управления для обеспечения доступности в случае атаки.

Подводя итоги, можно заключить, что системы дистанционного зондирования Земли сталкиваются с комплексом угроз информационной безопасности, охватывающих все элементы инфраструктуры – от спутников до архивов данных. Цифровизация космических систем, расширение участия частных операторов и рост киберэкспертизы у негосударственных акторов создают новые вызовы для обеспечения безопасности данных дистанционного зондирования Земли. Существующая российская нормативная база закладывает необходимые основы для защиты — ГОСТ Р 70669-2023 устанавливает требования к хранению данных, а методика «Роскосмоса» вводит обязательные критерии для частных операторов. Однако на практике остаётся ряд проблем, требующих дальнейшего решения: необходимость повышения защищённости наземных сегментов, разработка специализированных космических подходов к кибербезопасности, а также выработка международных норм, ограничивающих кибероперации против космических систем. Дальнейшие исследования должны быть направлены на анализ эффективности принимаемых мер и разработку методов противодействия новым видам угроз, включая атаки с использованием искусственного интеллекта.

Э. Р. Жданов, А. В. Крюков, О. С. Харина, А. В. Волков, Д. С. Степынин
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Рассмотрен вопрос обеспечения достоверности прогнозирования напряженно-деформированного состояния и физико-механических характеристик деталей из композиционных материалов при эксплуатационных нагрузках. Проведены экспериментальные исследования механической прочности изготовленных из радиопрозрачного композитного материала, стойкого к повышенным температурам, образцов, на основе которых рассчитан поправочный коэффициент прочности. Осуществлено математическое моделирование прочности материала с учетом полученного коэффициента, проведены механические экспериментальные испытания контрольных образцов. Выполнено сравнение результатов расчета прочности с использованием поправочного коэффициента и без него с данными, полученными при проведении испытаний. Доказано, что внедрение коэффициентов в математическую модель позволяет существенно повысить точность прогнозирования прочностных характеристик и несущей способности деталей из высокотемпературного полимерного композитного материала.
Ключевые слова*:* композиционный материал, анизотропия, уток, методы изготовления, технология, математическая модель, моделирование.
Для цитирования*:* Жданов Э. Р., Крюков А. В., Харина О. С., Волков А. В., Степынин Д. С. Математическое моделирование прочностных характеристик полимерных композитных материалов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (Омск, 6-8 октября 2026 года). Омск : ОНИИП, 2026.

E. R. Zhdanov, A. V. Kryukov, O. S. Kharina, A. V. Volkov, D. S. Stepynin
MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

MATHEMATICAL MODELING OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Abstract. The article considers the issue of ensuring the reliability of predicting the stress-strain state and physical and mechanical characteristics of parts made of composite materials under operating loads. Experimental studies of the mechanical strength of samples, made of radiotransparent composite material resistant to high temperatures, formed the basis for calculating the correction factor of strength. Taking into account this factor, the authors performed mathematical modeling of the material's strength and conducted mechanical tests on control samples. Strength calculations – both with and without the correction factor – were compared with the test data. The use of the correction factors in the mathematical model significantly improves the accuracy of predicting the characteristics of components made of high-temperature polymer composite materials.
Keywords*:* composite material, anisotropy, weft, manufacturing methods, technology, mathematical model, modeling.
For citation*:* Zhdanov E. R., Kryukov A. V., Kharina O. S., Volkov A. V., Stepynin D. S. Mathematical modeling of the strength characteristics of polymer composite materials // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Композиционный материал представляет собой объемную систему из взаимно нерастворимых компонентов с существенно различающимися свойствами, что позволяет синергетически использовать преимущества каждого из них. Классическая двухкомпонентная структура включает непрерывную матричную фазу, обеспечивающую монолитность, передачу нагрузок и защиту армирующих элементов, и дисперсный наполнитель, задающий направленные прочностные и функциональные характеристики.

Математическое моделирование прочностных характеристик композиционных материалов представляет собой комплекс методов, направленных на прогнозирование поведения материала под нагрузкой и оценку его предельных состояний.

Несмотря на строгость математического аппарата, в большинстве существующих расчетных схем композиционный материал рассматривается как условно однородная (квазиоднородная) среда. Однако идеализация структуры при моделировании вступает в противоречие с реальными технологическими процессами формования. В частности, конструкционные армирующие ткани обладают ограниченной смачиваемостью и впитывающей способностью. Вследствие этого матричное связующее не полностью проникает в микрообъемы наполнителя, а фактически обволакивает его, формируя локальные матричные прослойки и зоны неполной пропитки. Данное обстоятельство критически влияет на итоговую несущую способность детали и требует обязательного введения в расчетные модели специальных поправочных коэффициентов технологичности.

В рамках разработки конструкции обтекателя из высоконаполненного полимерного композитного материала (ВРКМ, ТУ 22.21.42.110-001-07509511-2023) был проведен комплекс экспериментально-расчетных исследований. На основе сопоставления данных численного моделирования и натурных механических испытаний были определены эмпирические поправочные коэффициенты.

В качестве исходных данных использовались справочные характеристики компонентов. Армирующий наполнитель – кремнезёмная нить К11-С6-170БА (линейная плотность 170 текс, гарантированная разрывная нагрузка не менее 34,3 Н / 3,5 кгс). Полимерная матрица – порошкообразное фталонитриловое связующее ФНИ-350 с прочностью 800 МПа. Объёмная доля волокна в препреге, полученном автоклавным формованием, принималась в диапазоне 55–65 %.

Учитывая технологический разброс свойств исходных компонентов, была проведена серия расчётов (125 комбинаций входных параметров) с варьированием разрывной нагрузки нити, прочности связующего и объёмной доли волокна. Результаты параметрического анализа представлены в таблице.

Результаты расчёта прочности композита по правилу смесей при варьировании входных параметров

Прочность нити, кгс	Прочность связующего, МПа	Объёмная доля волокна, %	Полученные значения прочности, МПа
3,0	650	50	39,2
3,2	700	55	40,9
3,4	750	60	56,2
3,6	800	65	66,2
3,8	850	70	77,0
Среднее значение			
3,4	750	60	55,9

Для верификации расчётной модели были проведены экспериментальные испытания образцов высокотемпературного полимерного композитного материала на растяжение. Испытания проводились при нормальной температуре на электронной испытательной машине Multi Actuator Test System Model Bi-04-CP-310 (датчик Bi-06-107 №06107043) с использованием клиновых захватов с насечкой под углом ±45°. Характер разрушения образцов представлен на рисунке.

Общий вид образцов после испытаний на растяжение

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показало, что среднее расчётное значение прочности (55,9 МПа) превышает среднее экспериментальное значение (46,2 МПа), полученное при испытаниях образцов под углом 90°. Абсолютная погрешность составила 9,7 МПа, а относительное расхождение – 17,4 %.

На основе полученных данных был определён поправочный коэффициент, учитывающий влияние реальной структуры материала и условий нагружения, значение которого составило 1,2.

Применение полученного поправочного коэффициента к минимальным расчётным значениям, приведенным в таблице, позволяет скорректировать аналитическую модель. В частности, при подстановке K=1,2 в формулу для нижней границы расчётной прочности (39,2 МПа) получаем значение 47,0 МПа, которое находится в хорошем согласии с экспериментальными данными (46,2 МПа).

Таким образом, установлено, что базовые аналитические модели, основанные на правиле смесей, дают систематическое завышение прочностных характеристик по сравнению с экспериментальными данными (расхождение составляет порядка 17,4 %), и предложенный подход с введением эмпирического поправочного коэффициента повышает адекватность расчётных схем при математическом моделировании и обеспечивает удовлетворительную точность прогноза прочностных характеристик высокотемпературного полимерного композитного материала.

Разработанная методика верификации математических моделей экспериментальным подтверждением основных характеристик материала позволяет существенно снизить финансовые затраты на этапе опытно-конструкторских работ за счёт реализации следующих преимуществ:

– сокращения объёма дорогостоящих натурных испытаний путём использования ограниченных экспериментальных данных, дополненных расчётными оценками;

– проведения углублённого параметрического анализа и выявления скрытых взаимосвязей между структурой материала, технологическими факторами и его эксплуатационными свойствами;

– тиражирования предложенного подхода на широкий класс аналогичных задач моделирования композитных конструкций.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (грант № 24-19-00328).

Д. Е. Зачатейский
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КАЧЕСТВА СВЯЗИ НА ДАЛЬНИХ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОЛИНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. Представлены результаты разработки методики расчета качества адаптивной коротковолновой радиосвязи.
Ключевые слова: распространение радиоволн, модель, ионосфера, качество радиосвязи.
Для цитирования: Зачатейский Д. Е. Методика расчета качества связи на дальних коротковолновых радиолиниях с использованием компьютерного моделирования. // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6-9 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП. 2026.

D. E. Zachateiskii
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

METHODOLOGY FOR CALCULATING COMMUNICATION QUALITY ON LONG-DISTANCE HF RADIO LINKS USING COMPUTER SIMULATION

Abstract. The paper presents the results of developing a methodology for calculating the quality of adaptive HF radio communication.
Keywords: radio wave propagation, model, ionosphere, radio communication quality.
For citation: Zachateiskii D. E. Methodology for calculating communication quality on long-distance HF radio links using computer simulation // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Из перечня практически значимых задач, требующих расчета качества связи, выделим задачу по обоснованию разработки новой системы связи или новых режимов работы уже существующей программно определяемой коротковолновой радиосистемы.

Качество дальней (при дальности связи L>100 км) коротковолновой связи определяется как природными (условия работы радиолинии), так и техническими факторами. К первым следует отнести свойства среды распространения радиоволн – ионосферы Земли, зависящие от географического расположения взаимодействующих радиоцентров, сезона, времени сеанса связи, уровня солнечной активности, наличия геомагнитных возмущений и др. Ко вторым – технические характеристики радиосредств, наиболее важными из которых считаются мощности излучения радиоволн передающими системами и чувствительность радиоприемных трактов, параметры радиомодемов, определяемых поверхностями их эффективности, характеристики антенных систем.

Примем, что для оценки качества связи расчетными способами необходимо определить (задать) следующие входные параметры:

– координаты взаимодействующих радиоцентров;

– дату и время сеансов связи;

– значения индекса солнечной активности;

– параметры КВ радиоканала, необходимые для работы модемов (граничные значения отношения сигнал/шум, частотного и временного рассеяния в радиоканале);

– полосы частот, требующихся для информационного обмена с использованием рассматриваемых радиомодемов;

– мощность радиопередающих устройств;

– модели антенно-фидерных систем (учитывающие азимутальные направления развертывания антенн и влияние на их диаграммы направленности характеристик подстилающий поверхности);

– модель радиошумов естественного и искусственного происхождения.

Будем считать, что для существующей радиосистемы эти параметры известны по результатам её натурных испытаний. Они могут быть заданы в качестве входных данных при моделировании. Результаты натурных испытаний могут быть использованы как данные для тестирования компьютерных моделей. Моделирование при этом выступает в качестве инструмента для интерпретации полученных экспериментальных данных.

Расчеты параметров коротковолновых радиолиния могут проводиться с использованием компьютерных программ, базирующихся на моделях ионосферы Земли и позволяющих выполнить расчет траекторий распространения радиоволн в неоднородной ионосферной плазме и оценить их энергетические характеристики – напряженность поля, создаваемого радиопередающий устройством в пункте приема и отношение сигнал/шум (далее ОСШ). Из расчета геометрических (траекторных) характеристик радионаправления следует оценка временного рассеяния сигналов, определяемых многолучевым распространением радиоволн на ионосферных радиолиниях.

Дальнее рассмотрение в данной работе ведется с ориентацией на возможности программного комплекса «Трасса», разработанного в Южном Федеральном университете (г. Ростов-на-Дону).

Оценка возможного качества связи включает в себя прогнозирование значений максимально-применимых (МПЧ) и наименьших применимых (НПЧ) частот на некотором интервале времени. При расчете НПЧ требуется учитывать требования к радиоканалу, определяемые техническими характеристиками радиомодема. Как правило, рассматриваемый при оценке качества радиосвязи временной интервал определяется «временем предоставления радиоканала абоненту», но на практике лучше использовать суточный ход МПЧ и НПЧ радиолинии. Если «время предоставления радиоканала» меньше суток, то можно выделить из суточной зависимости интервал времени, определяемый этими временными границами. Если больше суток – рассмотреть несколько суточных интервалов, для каждого из которых рекомендуется рассчитать отдельную зависимость МПЧ и НПЧ от времени.

Исходя из полученных расчетных зависимостей МПЧ(t) и НПЧ(t) и с учетом существующих организационных ограничений, определяемых Регламентом радиосвязи, должна быть выбрана сетка требуемых рабочих частот, на которой возможна работа рассматриваемой радиолинии. Отметим, что она может не совпадать с сеткой частот, использовавшейся при проведении натурных испытаний уже существующей системы связи, однако при настройке и тестировании модели радиоканала на первом этапе применения методики желательно обеспечить такое соответствие. Также следует учитывать цели получения прогнозной оценки качества связи. Если эта работа проводится для оценки возможностей новой системы связи, которые могут или могли быть показаны в ходе отдельных натурных испытаний, то сетка частот должна быть определена исходя из сроков их проведения. Если целью прогнозирования является оценка работы радиолинии в «любых» условиях, то рекомендуется выполнить эту работу для полуденных

и полуночных сеансов связи, проводимых в зимних (22 декабря) условиях при различных уровнях солнечной активности. Результаты этой работы могут в дальнейшем использоваться для составления радиочастотных заявок на получение радиочастотных ресурсов, необходимых для испытаний или работы системы радиосвязи.

Возможность предоставления услуг связи с должным качеством определяется далее исходя из следующей последовательности работ:

Очевидно, что для всего времени предоставления канала абоненту должно выполняться требование МПЧ(t)>НПЧ(t) и в частотном интервале от НПЧ до МПЧ должна существовать возможность выбора рабочих частот. Расчет значений НПЧ должен быть выполнен несколько раз для оценки изменения зависимости данного параметра от ОСШ, необходимого для работы модема в различных режимах, но в 2026 г. в программе «Трасса» реализована возможность расчета суточного хода ОСШ на заданных частотах. Это позволяет оценить время доступности радиосвязи, наложив на эту зависимость линию, соответствующую пороговому значению ОСШ, что ускоряет проведение работ по оценке доступности связи. Так, например, в таблице показаны отношения сигнал шум вычисленные на интервале частот от 5 до 25 МГц с шагом 5 МГц. По критерию расчетное значение ОСШ > 25 дБ могут быть отобраны частоты, на которых возможна передача сигнала с модуляцией КАМ 64. Курсивом выделены пары (время; частота), не соответствующие этому требованию. Прочерками – пары с отрицательными значениями ОСШ.

Время, час	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ОСШ на частоте 5 МГц (дБ)	30	30	31	30	28	*15*	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	30	30	30	30	30	30
ОСШ на частоте 10 МГц (дБ)	34	37	---	---	---	26	*22*	*23*	*17*	*15*	*11*	*10*	*12*	*15*	*18*	*19*	*23*	27	30	32	32	30	31	32	34
ОСШ на частоте 15 МГц (дБ)	---	---	---	---	---	---	31	28	28	26	25	25	26	26	27	28	29	37	30	32	44	---	---	---	---
ОСШ на частоте 20 МГц (дБ)	---	---	---	---	---	---	---	33	29	30	29	31	29	29	29	30	30	32	39	---	---	---	---	---	---
ОСШ на частоте 25 МГц (дБ)	---	---	---	---	---	---	---	---	40	33	32	32	33	33	33	34	38	---	---	---	---	---	---	---	---

Аналогичные таблицы должны быть составлены для всех возможных режимов работы радиомодемов.

Обобщая данную информацию для каждого часа суток можно определить набор доступных режимов работы радиомодема.

Каждому из режимов, как правило, соответствует своя скорость информационного обмена (информационная скорость). Выполнив процедуру выбора режима работы радиомодема на некотором временном интервале можно оценить время, которое будет затрачено на передачу файла заданного размера и, исходя из этого, определить эффективную скорость передачи данных – отношение объема файла к длительности фазы передачи данных (астрономическое время от начала передачи файла до завершения передачи). При определении эффективной скорости радиолинии должны быть учтены затраты времени на оперативную оценку качества каналов на разрешенных для связи частотах (канальное зондирование), выбор лучшего по качеству канала, вхождение в связь, перезапроса неправильно принятых пакетов и пр.

Предлагается определять максимально возможную в рассматриваемых условиях эффективную скорость радиолинии и минимально возможную. Для этих же условий следует выбрать экспериментальные данные о работе существующей радиолинии и, исходя из результатов сравнительного анализа данных расчета и эксперимента, принимать решения о целесообразности проведения работ по созданию новых систем связи.

Заключение

В качестве критерия качества адаптивной коротковолновой связи предлагается рассматривать эффективную скорость передачи данных или эффективную скорость работы радиолинии. Программа «Трасса» может рассматриваться как задел для разработки программного обеспечения, обеспечивающего оценку граничных значений эффективной скорости и проведения сравнительного анализа действующих и разрабатываемых систем дальней коротковолновой радиосвязи.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Я. В. Копцов[1], Я. А. Илюшин[1,2]
[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Москва, Российская Федерация
[2]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Москва, Российская Федерация

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПОЛЯРИЗОВАННОГО МИКРОВОЛНОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКАХ

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования переноса поляризованного микроволнового теплового излучения в атмосферных осадках в виде слоя несферических дождевых капель, наклонённых к вертикали. Методом дискретных ординат рассчитаны параметры Стокса для длин волн 3, 8 и 15,4 мм при интенсивностях дождя 1–10 мм/ч с учётом частичной поляризации подстилающей поверхности. Показано, что третий параметр Стокса возникает вследствие наклона капель и его угловое распределение антисимметрично относительно плоскости наклона. Величина эффекта зависит от длины волны и интенсивности осадков, что позволяет использовать третий параметр Стокса как дополнительный индикатор наклона дождевых капель для повышения точности дистанционного зондирования осадков.
Ключевые слова*:* перенос излучения, радиометрия, осадки, атмосфера, дождь.
Для цитирования*:* Копцов Я. В., Илюшин Я. А. Численное моделирование переноса поляризованного микроволнового радиоизлучения в атмосферных осадках // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

Ya. V. Koptsov [1], Ya. A. Ilyushin[1,2]
[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
[2]Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS
Moscow, Russian Federation

NUMERICAL MODELING OF POLARIZED MICROWAVE RADIATION TRANSPORT IN ATMOSPHERIC PRECIPITATION

Abstract. This paper presents the results of numerical modeling regarding the transport of polarized microwave thermal radiation through atmospheric precipitation—specifically, a layer of nonspherical raindrops tilted relative to the vertical. Using the discrete ordinate method, Stokes parameters were calculated for wavelengths of 3, 8, and 15.4 mm and rainfall rates of 1–10 mm/h, accounting for the partial polarization of the underlying surface. It is shown that the third Stokes parameter arises due to raindrop tilt and that its angular distribution is antisymmetric with respect to the tilt plane. The magnitude of this effect depends on the wavelength and precipitation intensity, suggesting that the third Stokes parameter can serve as an additional indicator of raindrop tilt to improve the accuracy of remote sensing of precipitation.
Keywords*:* radiative transfer, radiometry, precipitation, atmosphere, rain.
For citation*:* Koptsov Ya. V., Ilyushin Ya. A. Numerical modeling of polarized microwave radiation transport in atmospheric precipitation // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Актуальность

Атмосферные осадки играют важную роль в круговороте воды и формировании климата. Однако сеть наземных наблюдений не покрывает всю поверхность Земли, особенно океаны и полярные области. Инфракрасные методы зондирования дают слабую корреляцию между яркостной температурой и осадками. Микроволновая радиометрия (рис. 1) обеспечивает более прямую связь радиояркостной температуры с интенсивностью дождей. Современные радиометры позволяют измерять первые два параметра Стокса, а в перспективе — и третий, что открывает дополнительные возможности для дистанционного мониторинга осадков.

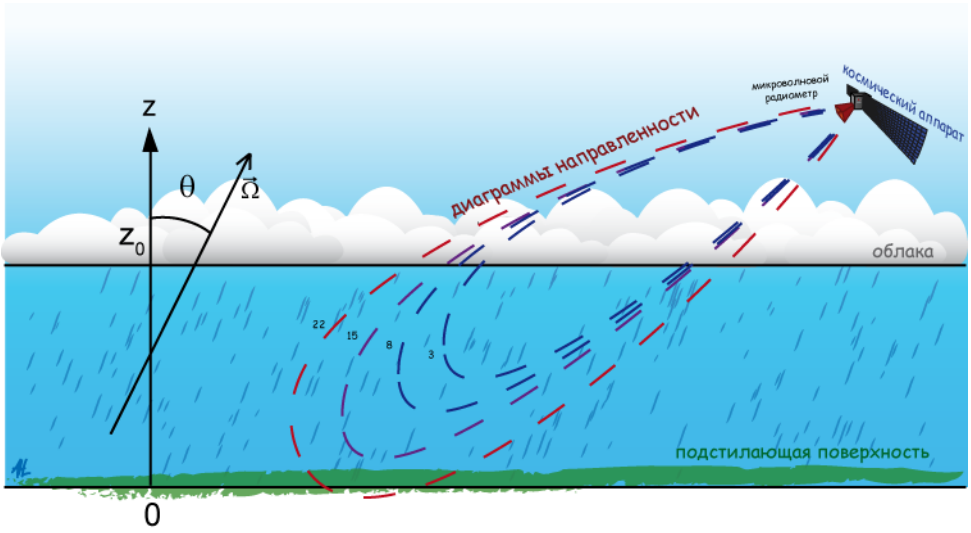


Рис. 1. *Схематическое изображение эксперимента по микроволновой радиометрии атмосферных осадков с орбитального космического аппарата*

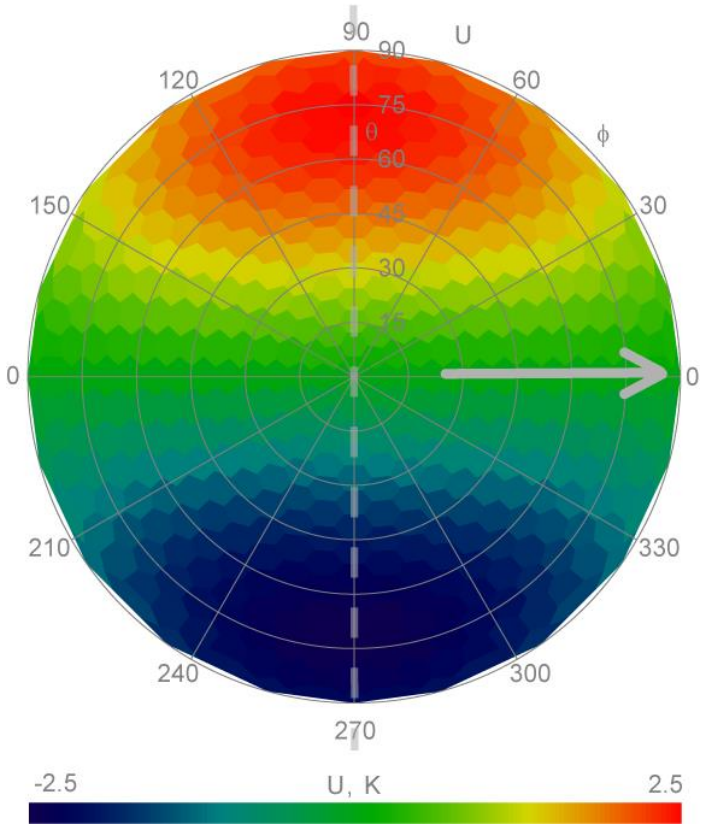


Рис. 2. *Угловое распределение третьего параметра Стокса U радиотеплового микроволнового излучения атмосферных осадков*

Модель и метод

Рассматривается плоский однородный слой дождевой атмосферы, заполненный несферическими каплями в форме сплюснутых сфероидов. Капли распределены по размерам согласно известной модели и наклонены к вертикали под некоторым углом. Подстилающая поверхность считается плоской, частично поляризованной. Для расчёта переноса поляризованного теплового излучения используется уравнение переноса в плоскосколистой среде. Численное решение выполнено методом дискретных ординат с конечно-разностной схемой. Учитывается частичная поляризация собственного излучения поверхности. Расчёты проведены для длин волн 3, 8 и 15,4 мм, что соответствует окнам прозрачности атмосферы и рабочим частотам используемых радиометров. Основное внимание уделено интенсивностям осадков 1–10 мм/ч, наиболее часто встречающимся по данным наблюдений.

Результаты

Показано, что третий параметр Стокса в восходящем тепловом излучении дождевого слоя возникает из-за наклона несферических капель. Его угловое распределение (рис. 2) оказывается практически антисимметричным относительно плоскости наклона осей капель. Величина эффекта зависит от длины волны. С увеличением длины волны влияние наклона капель ослабевает вблизи зенитного направления, но усиливается при наблюдении вблизи горизонта. Зависимость третьего параметра Стокса от интенсивности осадков проявляется в основном при слабых дождях (до 10 мм/ч), а при более сильных осадках выходит на насыщение. Кривые для разных углов наклона капель не пересекаются, что позволяет использовать третий параметр Стокса как индикатор наклона дождевых капель. Отмечена тенденция к росту наблюдаемых значений третьего параметра Стокса с увеличением длины волны, что связано со снижением альбедо однократного рассеяния несферических частиц и уменьшением вклада рассеяния на более низких частотах.

Выводы

Поляризационные характеристики микроволнового теплового излучения дождевой атмосферы существенно зависят от длины волны и угла наклона капель. Учёт этих эффектов важен для интерпретации данных дистанционного зондирования. Третий параметр Стокса может служить дополнительным индикатором наклона дождевых капель и повышать точность определения зон дождей и оценки интенсивности осадков над сушей и океаном. Результаты могут найти применение в метеорологических исследованиях и системах мониторинга погоды, включая улучшение прогнозирования осадков и изучение климатических процессов.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова с использованием суперкомпьютерных ресурсов.

Б. А. Косарев[1,2], Ф. А. Букин[2], Д. В. Михайлов[3], Д. В. Лазарев[4]
[1]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация
[2]Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация
[3]Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет
Омск, Российская Федерация
[4]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ВЗАИМОВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И НАГРУЗКИ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОСТАНЦИЙ И РАДИОЦЕНТРОВ

Аннотация. Коротковолновая (КВ) радиосвязь является перспективным видом связи для арктических изолированных территорий. Для таких удаленных территорий электроснабжение радиостанций и комплексов КВ-радиосвязи может быть организовано только при помощи систем автономного электроснабжения. Однако резкопеременный характер нагрузки радиостанций и комплексов КВ-радиосвязи способствует возникновению феррорезонансных процессов в автономной системе электроснабжения. Так как радиоаппаратура подключается к автономной системе электроснабжения посредством импульсных источников питания, то феррорезонансные процессы и импульсные источники питания становятся источником высших гармоник. В этой связи актуальной задачей является обеспечение электромагнитной совместимости силового оборудования автономной системы электроснабжения и радиоаппаратуры. Целью работы является провести исследование электромагнитной совместимости силового оборудования автономной системы электроснабжения и КВ-радиоаппаратуры. По результатам исследований показана взаимосвязь между резкопеременным характером нагрузки и феррорезонансом. Выполнена оценка гармонических искажений сетевого напряжения в условиях феррорезонанса и при подключении импульсных источников питания. В результате проведенного моделирования установлено следующее: в точке подключения импульсного источника питания спектр напряжения представлен нечетными гармониками 3 (7,3%), 5 (1,6%), 7 (3,2%), 9 (0,4%), 11 (2%), 13 (0,2%) порядков; при феррорезонансе спектр напряжения содержит нечетные гармоники 3 (33%), 5 (17%), 7 (10%), 9 (7%) порядков. Приведено описание механизма эмиссии высших гармоник из автономной системы электроснабжения в КВ-радиоаппаратуру и обратно.

Ключевые слова: автономная система электроснабжения, коротковолновая радиосвязь, эмиссия высших гармоник, феррорезонансный процесс, возобновляемый источник энергии, сетевой инвертор, электромагнитная совместимость, резкопеременная нагрузка, аккумуляторная система.

Для цитирования: Косарев Б. А., Букин Ф. А., Михайлов Д. В., Лазарев Д. В. Взаимовлияние системы электроснабжения и нагрузки коротковолновых радиостанций и радиоцентров // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

B. A. Kosarev[1,2], F. A. Bukin[2], D. V. Mikhaylov[3], D. V. Lazarev[4]
[1]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation
[2]Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation
[3]The Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russian Federation
[4]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

INTERACTION BETWEEN THE POWER SUPPLY SYSTEM AND THE LOAD OF SHORT-WAVE RADIO STATIONS AND RADIO CENTERS

Abstract. High-frequency (HF) radio communication is a promising communication type for isolated Arctic territories. For such remote areas, the power supply for radio stations and HF communication complexes can only be organized using autonomous power supply systems. However, the highly variable nature of the load from radio stations and HF communication complexes promotes the occurrence of ferroresonant processes in the autonomous power supply system. Since the radio equipment is connected to the autonomous power supply system via switched-mode power supplies (SMPS), both ferroresonant processes and SMPS become a source of higher harmonics. In this regard, ensuring the electromagnetic compatibility (EMC) of the power equipment in the autonomous power supply system and the radio equipment is an urgent task. The aim of this work is to investigate the electromagnetic compatibility between the power equipment of the autonomous power supply system and the HF radio equipment. The research results demonstrate the relationship between the highly variable load profile and ferroresonance. The authors assess the harmonic distortion of the mains voltage under ferroresonance conditions and when connecting switched-mode power supplies. The simulation results revealed the following: at the connection point of the switched-mode power supply, the voltage spectrum is represented by the 3rd (7.3%), 5th (1.6%), 7th (3.2%), 9th (0.4%), 11th (2%), and 13th (0.2%) odd harmonics; under ferroresonance, the voltage spectrum contains the 3rd (33%), 5th (17%), 7th (10%), and 9th (7%) odd harmonics. Finally, the paper describes the mechanism of higher harmonic emission from the autonomous power supply system to the HF radio equipment and vice versa.

Keywords*:* autonomous power supply system, high-frequency radio communication, higher harmonic emission, ferroresonant process, renewable energy source, grid-tied inverter, electromagnetic compatibility, highly variable load, battery storage system.

For citation*:* Kosarev B. A., Bukin F. A., Mikhaylov D. V., Lazarev D. V. Interaction between the power supply system and the load of short-wave radio stations and radio centers // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Поскольку дальность коротковолновой (КВ) радиосвязи может варьироваться от нескольких десятков до тысяч километров, этот тип связи является наиболее перспективным для арктических, изолированных и удаленных территорий, к которым в Российской Федерации относится Крайний Север. С точки зрения электроснабжения радиостанции и комплексы КВ-связи обладают резкопеременным характером нагрузки с мощностью потребления от единиц до сотен киловатт. Учитывая изоляцию северных территорий от Единой Энергетической Системы, электроснабжение радиостанций и комплексов КВ-радиосвязи может быть организовано только при помощи автономных систем электроснабжения (АСЭ). Для поддержания высокого качества КВ-радиосвязи АСЭ должны обеспечивать первую категорию надежности, высокие значения показателей качества электрической энергии и не создавать электромагнитные помехи.

Радиоприем/радиопередача в диапазоне частот 3…30 МГц характеризуется высокой степенью зависимости от естественных шумов (атмосферных, галактических). Также на качестве связи оказывают влияние станционные помехи. Уровень естественных шумов изменить невозможно. Устранить помехи от других радиостанций технически сложно. В связи с этим даже при отсутствии помех от силового электрооборудования комплекса КВ-радиосвязи не всегда можно обеспечить приемлемое отношение сигнал/шум (ОСШ), особенно в условиях Крайнего Севера. Амплитуды помех от силового оборудования должны достаточно малы, чтобы ими можно было пренебречь в измерениях и расчетах. Таким образом, обязательным требованием к АСЭ радиостанций и комплексов КВ-радиосвязи является низкий уровень шумов.

Подключение КВ-радиоаппаратуры к АСЭ осуществляется при помощи импульс-

ных источников питания (ИИП), которые как нелинейная нагрузка являются источником высших гармоник. В АСЭ влияние ИИП на параметры качества электроэнергии может оказаться существенным, несмотря на различные схемотехнические решения. Поэтому целью работы является исследование электромагнитной совместимости силового оборудования АСЭ и КВ-радиоаппаратуры.

Исходя из величины электропотребления типичных радиостанций и комплексов КВ-радиосвязи, необходимо создавать АСЭ на базе энергетических установок малой мощности, таких как газопоршневые установки (ГПУ), дизель-генераторные установки (ДГУ), источники переменной возобновляемой энергии (ИПВЭ) с накопителем электрической энергии (НЭЭ) или гибридные электроустановки. Относительно малые значения моментов инерции (0,5 – 2 с) ГПУ, ДГУ, их ограничения по технологическому минимуму нагрузки и ее набросам, а также стохастический характер выработки ИПВЭ могут приводить к превышению частотой и напряжением их предельно допустимых отклонений в условиях резкопеременного характера нагрузки.

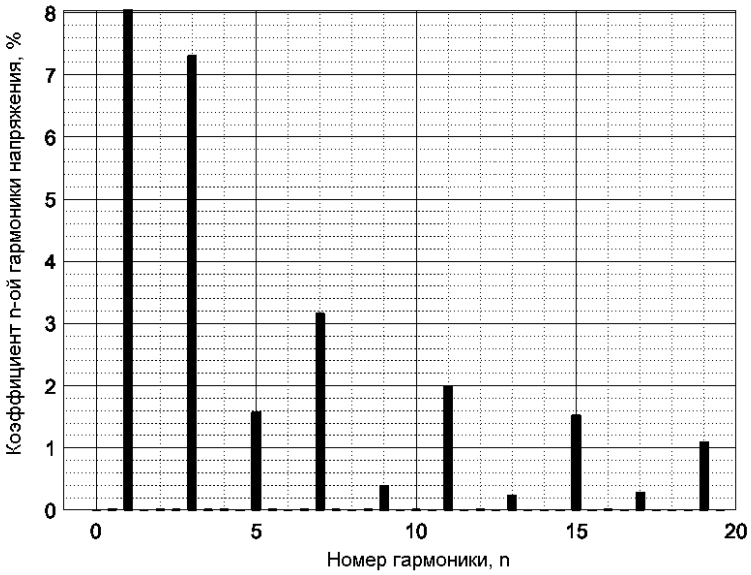
Гибридные установки, содержащие НЭЭ, позволяют увеличить динамическую устойчивость ДГУ, ГПУ, нивелировать стохастический характер выработки ИПВЭ, повысить надежность электроснабжения потребителя. Однако инвертор, входящий в их состав, ухудшает синусоидальную форму кривых напряжения и тока сети. Возникающие при работе инвертора высшие гармоники могут оказывать влияние на качество КВ-радиосвязи. При этом особенно важным является вопрос электромагнитной совместимости инвертора и КВ-радиоприемника.

В условиях резкопеременной нагрузки колебания напряжения и частоты в АСЭ определяют величину магнитного потока силовых трансформаторов. Отношение напряжения и частоты, выраженные в относительных единицах, используются как индикатор режима насыщения магнитной системы трансформатора. Поэтому вызванные резкопеременным характером нагрузки комплекса связи отклонения напряжения или частоты в АСЭ могут привести к режиму насыщения. В режиме насыщения сопротивление намагничивающей ветви трансформатора уменьшается и может совпасть с эквивалентным емкостным сопротивлением прилегающего участка сети, что приведет к формированию феррорезонанса. Такой процесс с точки зрения ЭМС является источником высших гармоник, которые будут сказываться на ОСШ в каналах связи. Следует отметить, что искажение ИПП синусоидальной формы кривых напряжения и тока могут привести к формированию феррорезонансных колебательных контуров на частотах нечетных гармоник.

На основании вышеизложенного проблемным вопросом организации КВ-радиосвязи на Крайнем Севере, а также на любых других удаленных территориях является электромагнитная совместимость силового электрооборудования АСЭ и радиоаппаратуры. Среди помехообразующих факторов следует отметить ФП, обусловленные низкой динамической устойчивостью АСЭ и резкопеременным характером нагрузки, и ИИП радиоаппаратуры.

Рассмотрим механизмы эмиссии высших гармоник в сеть АСЭ и КВ-радиоаппаратуру. Эмиссия высших гармоник в АСЭ радиостанций и комплексов КВ-радиосвязи возникает за счет наличия гальванической связи между силовым оборудованием и радиоаппаратурой (нулевой проводник, шина заземления), а также из-за емкостных связей проводников разных цепей. Индуктивный путь распространения высших гармоник маловероятен, так как для этого необходимо параллельное расположение слаботочного и сильноточного проводников на значительном протяжении.

В результате компьютерного моделирования установлено, что в точке подключения ИИП спектр напряжения представлен нечетными гармониками 3 (7,3%), 5 (1,6%), 7 (3,2%), 9 (0,4%), 11 (2%), 13 (0,2%) порядков (см. рисунок).



Амплитудный спектр напряжения в точке подключения ИИП к сети АСЭ

В условиях ФП спектр напряжения содержит нечетные гармоники 3 (33%), 5 (17%), 7 (10%), 9 (7%) порядков.

Таким образом, в работе исследованы вопросы, возникающие при организации АСЭ радиостанций и комплексов КВ-радиосвязи, а именно: рассмотрена электромагнитная совместимость силового электрооборудования и КВ-радиоаппаратуры; показана взаимосвязь между резкопеременным характером нагрузки и феррорезонансом; выполнена оценка гармонических искажений сетевого напряжения в условиях феррорезонанса и при подключении ИИП. Схожие спектры напряжения для ФП и ИИП способствуют увеличению амплитуды нечетных гармоник в условиях феррорезонанса.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

Я. Е. Львович, А. П. Преображенский, И. А. Тихонов
Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

Аннотация. Рассматривается задача проектирования антенны, сформированной на основе металлической и диэлектрической компоненты. В качестве основных рабочих составляющих рассматриваются металлические прямоугольные параллелепипеды, которые нанесены на поверхность диэлектрической подложки периодическим образом. В ходе моделирования предлагается применять комбинацию метода интегральных уравнений и метода периодических структур. Для решения интегрального уравнения используется метод коллокаций. Для определения требуемых параметров предлагается использовать подход, базирующийся на многоальтернативной оптимизации. На основе рассмотренных подходов определена рабочая частота антенны.
Ключевые слова: моделирование, антенна, оптимизация, интегральное уравнение, параметр.
Для цитирования: Львович Я. Е., Преображенский А. П., Тихонов И. А. Моделирование характеристик металлодиэлектрической антенны // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

Y. E. Lvovich, A. P. Preobrazhensky, I. A. Tikhonov
Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russian Federation

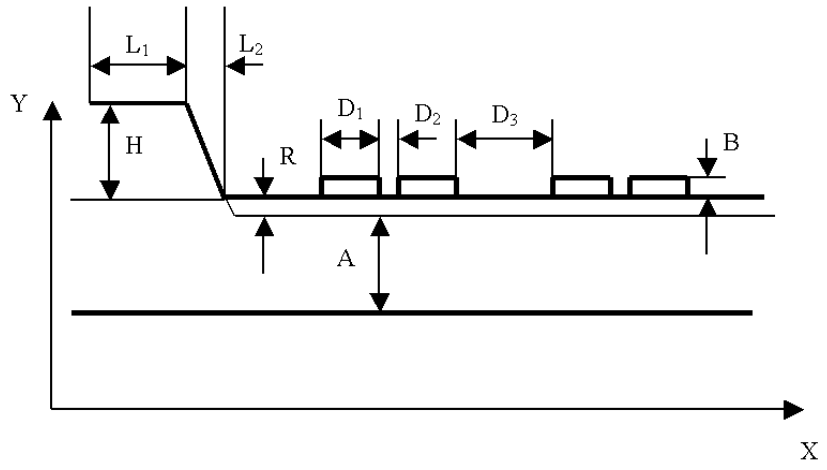
MODELING OF CHARACTERISTICS OF A METAL-DIELECTRIC ANTENNA

Abstract. The paper discusses the problem of designing an antenna formed on the basis of metal and dielectric components. Metal rectangular parallelepipeds, which are periodically applied to the surface of the dielectric substrate, are considered as the main working components. During the simulation, it is proposed to use a combination of the method of integral equations. In addition, the reflection from metal parallelepipeds was taken into account on the basis of the theory of periodic structures. The method of collocations is used to solve the integral equation. To determine the required parameters, it is proposed to use an approach based on multi-alternative optimization. Based on the considered approaches, the operating frequency of the antenna was determined.
Keywords: modeling, antenna, optimization, integral equation, parameter.
For citation: Lvovich Y. E., Preobrazhensky A. P., Tikhonov I. A. Modeling of characteristics of a metal-dielectric antenna // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

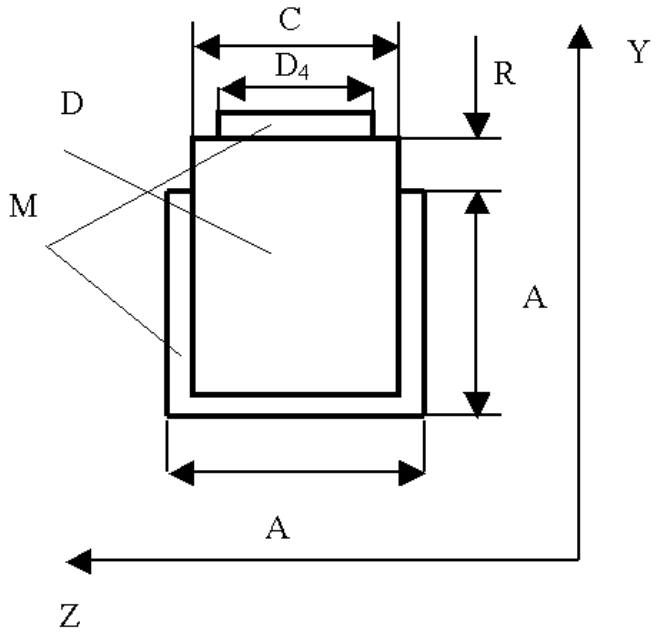
Для решения различных практических задач применяют металлодиэлектрические антенны. Их создают на основе комбинации проводящей структуры и диэлектрической подложки. Основные преимущества данных антенн заключаются в расширении частотного диапазона, а также повышении управляемости частоты и формы диаграммы. Во многих случаев антенны имеют достаточно сложную форму. Условия на границе металла и диэлектрика должны учитываться корректным образом. В этой связи для моделирования их характеристик необходимо опираться на строгие электродинамические методы. Кроме того, варианты размещения элементов антенного устройства могут быть разные. Чтобы обеспечить необходимые характеристики, требуется использовать методы оптимизации.

Целью данной работы является разработка подхода для моделирования металлодиэлектрической антенны, основанного на комбинации метода интегральных уравнений и многоальтернативной оптимизации.

На рисунке показан вид анализируемой антенной структуры в двух плоскостях. Указаны размеры элементов. Буквой M обозначена металлическая часть, буквой D обозначена диэлектрическая часть.



а



б

Рис. 1. *Вид анализируемой антенной структуры в двух плоскостях: а) в плоскости X0Y, б) в плоскости Y0Z*

Для того, чтобы обеспечить необходимое управление электродинамическими характеристиками в металлодиэлектрической антенне, металлические отражатели размещались периодическим образом. Они имели одинаковую форму и размеры. Моделирование рассеяния электромагнитной волны на металлическом прямоугольном параллелепипеде осуществлялось на основе интегрального уравнения.

Каждый из простых металлических элементов представляет собой прямоугольный параллелепипед. На диэлектрической подложке такие элементы размещаются таким образом, что их координаты x отличаются на одно и то же значение. То есть чтобы определить все компоненты плотности поверхностного тока мы можем применять теорию

периодических структур.

Решение интегрального уравнения мы предлагаем вести на основе метода коллокаций. В качестве базовых функций используем кусочно-постоянные функции. Это позволяет привести интегральное уравнение к системе линейных уравнений. Чтобы провести расчет рассеянного поля применяем интеграл Кирхгофа.

Подход, базирующийся на многоальтернативной оптимизации, применяется для того, чтобы определить размеры металлических элементов. В качестве основного критерия проектирования мы рассматриваем обеспечение рабочей частоты.

Алгоритм, на основе которого происходит проектирование антенной системы, состоит из следующих этапов:

1. Задание характеристик диэлектрической подложки, основных размеров различных элементов и возможных ограничений.

2. Использование метода интегральных уравнений для расчета плотностей токов на металлическом элементе.

3. Применение теории периодических структур.

4. Расчет рассеянных полей.

5. Применение модели многоальтернативной оптимизации.

6. Определение рабочей частоты антенны.

На основе разработанного алгоритма проводилось исследование рассматриваемой металлодиэлектрической антенны для случая Е-поляризации. Были установлены границы частотного диапазона [9, 13] ГГц. В ходе моделирования и использования оптимизационного подхода были определены такие характеристики: C = 9,6 мм, R = 1,87 мм, H = 7 мм, L_1 = 12 мм, L_2 = 9 мм, A = 12 мм, B = 0,07 мм, D_1=1,5 мм, D_2 = 3,2 мм, D_3 = 13 мм, D_4 = 6,8 мм. Диэлектрическая подложка формировалась на основе полистирола: $\varepsilon = 2{,}55$, $tg\delta = 2 \cdot 10^{-4}$. В результате осуществленного анализа было показано, что рабочая частота антенны – 1,.9 ГГц.

В работе разработан и апробирован комбинированный алгоритм на основе метода интегральных уравнений и методики многоальтернативной оптимизации. В результате моделирования и оптимизации металлодиэлектрической антенны была продемонстрирована возможность определения необходимых для проектирования параметров при заданных ограничениях. При использовании предложенного полхода могут применяться разные критерии. Определена рабочая частота антенны.

Ю. Б. Минин
Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
Фрязино, Российская Федерация

ОПТИМИЗАЦИЯ ХРАНЕНИЯ КРЫЛОВСКОГО БАЗИСА ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАССЕЯНИЯ

Аннотация. Исследуется снижение затрат оперативной памяти при решении двумерной задачи рассеяния электромагнитной волны объемным интегральным методом с быстрым преобразованием Фурье. Сопоставлены полная область наблюдения, компактная прямоугольная область и хранение базиса только на материальной области. Показано, что сокращение области свертки дает основной выигрыш, а ограничение крыловского базиса обеспечивает дополнительную экономию памяти.
Ключевые слова: электромагнитное рассеяние, объемное интегральное уравнение, быстрое преобразование Фурье, метод обобщенных минимальных невязок, крыловский базис, вычислительная память.
Для цитирования: Минин Ю. Б. Оптимизация хранения крыловского базиса при численном моделировании электромагнитного рассеяния // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

Iu. B. Minin
Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS
Fryazino, Russian Federation

OPTIMIZATION OF KRYLOV-BASIS STORAGE IN NUMERICAL ELECTROMAGNETIC SCATTERING SIMULATIONS

Abstract. Memory reduction is studied for a two-dimensional electromagnetic-scattering problem solved by a volume-integral method with fast Fourier transforms. Full observation-domain storage, a compact rectangular domain, and basis storage restricted to the material region are compared. Compacting the convolution domain gives the main saving, while material-only Krylov vectors provide an additional geometry-dependent memory reduction.
Keywords: electromagnetic scattering, volume integral equation, fast Fourier transform, generalized minimal residual method, Krylov basis, computational memory.
For citation: Minin Iu. B. Optimization of Krylov-basis storage in numerical electromagnetic scattering simulations // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

При решении задач электромагнитного рассеяния объемные интегральные уравнения позволяют учитывать условие излучения без введения искусственной внешней границы. На равномерной декартовой сетке матрично-векторное произведение с функцией Грина может быть ускорено быстрым преобразованием Фурье, поэтому хранение плотной матрицы взаимодействия не требуется. После устранения этой матрицы заметную часть расхода оперативной памяти способен определять крыловский базис, формируемый итерационным методом обобщенных минимальных невязок. Его размер зависит как от числа одновременно сохраняемых векторов, так и от числа узлов, на которых каждый из этих векторов представлен.

Цель работы состоит в раздельной оценке трех способов уменьшения вычислительных затрат: сокращения прямоугольной области, на которой выполняется свертка, ограничения хранимых векторов материальной областью и применения перезапусков итерационного метода.

Сравнение проводится для одной и той же дискретной задачи, чтобы отделить экономию памяти от изменений физической постановки или пространственной аппроксимации. Рассматриваются сплошной диэлектрический цилиндр и кольцевая диэлектрическая структура, что позволяет дополнительно оценить влияние внутренней пустой области.

Использованы четыре представления дискретной системы. В первом неизвестные и свертка задаются на всей квадратной области наблюдения. Во втором неизвестные сохраняются только в узлах, принадлежащих диэлектрику, но для свертки по-прежнему используется полная область наблюдения. В третьем неизвестные задаются на наименьшем прямоугольнике сетки, содержащем рассеиватель, и свертка выполняется на этом же прямоугольнике. В четвертом варианте свертка выполняется на компактном прямоугольнике, а крыловские векторы хранятся только на материальной области. Шаг исходной сетки и значения дискретного оператора при этом не изменяются, а поле вне решаемой области восстанавливается после завершения итераций.

Во всех вариантах применен общий критерий сходимости: явно пересчитанная относительная невязка не должна превышать десять в минус восьмой степени. После восстановления поля невязка дополнительно проверяется на полной области наблюдения. Для контроля физической точности независимо построено модальное решение задачи рассеяния на круговом цилиндре и кольцевой структуре. С ним сопоставлялись как комплексное поле на сетке, так и угловая амплитуда рассеяния. Такой протокол позволяет различать ошибку итерационного решения и ошибку, связанную с пространственной дискретизацией.

Наиболее показательным является расчет сплошного цилиндра на сетке из 1024 на 1024 узла. Полная область наблюдения содержит 1 048 576 узлов, компактный прямоугольник – 262 144 узла, а материальная область – 205 508 узлов. При одинаковом числе столбцов базиса переход от всей области наблюдения к материальной области дает уменьшение объема базиса в 5,102 раза. Однако более корректное сравнение с уже компактной прямоугольной областью показывает дополнительный выигрыш только в 1,276 раза. Это различие важно, поскольку значительная часть кажущейся экономии относительно полной области связана не с ограничением векторов материалом, а с удалением пустого пространства вокруг объекта.

В повторных измерениях для этой сетки переход от компактного прямоугольника к хранению базиса только на материальной области уменьшил фактически записанный объем крыловского базиса с 248,0 до 191,3 мебибайта. Медианное пиковое потребление памяти процесса снизилось с 479,0 до 424,5 мебибайта, а медианное время решения изменилось с 6,320 до 6,023 секунды. Интервалы между первым и третьим квартилями времени частично перекрываются, поэтому эти измерения не дают основания связывать ограничение векторов материальной областью с устойчивым аппаратно-независимым ускорением. Основной выигрыш по времени в данной реализации обеспечивается прежде всего уменьшением области свертки.

Кольцевая структура демонстрирует иную картину. Внутренняя пустая область занимает заметную часть ограничивающего прямоугольника, поэтому при одинаковом числе столбцов базиса его объем уменьшается в 3,545 раза. Для сетки из 512 на 512 узлов записанный объем базиса сокращается с 25,0 до 7,1 мебибайта. Вместе с тем медианное пиковое потребление памяти процесса меняется лишь с 135,2 до 133,7 мебибайта. Следовательно, уменьшение одного компонента памяти не обязано приводить к такому же уменьшению общего потребления: существенную долю могут занимать спектр ядра свертки, рабочие массивы и данные, необходимые для восстановления поля на полной области.

Перезапуск итерационного метода воздействует на другой компонент затрат, ограничивая число одновременно хранимых крыловских векторов. Для сплошного цилиндра на сетке из 512 на 512 узлов расчет без перезапуска сходится за 60 итераций. При ограничении длины цикла сорока итерациями требуется около 110 итераций, а при длине цикла двадцать – более 200. Для варианта с хранением векторов только на материальной области объем записанного базиса при этом уменьшается с 47,7 до 32,1 и 16,4 мебибайта соответственно, но растут число сверток и время решения. Таким образом, перезапуск позволяет обменивать память на дополнительную вычислительную работу и должен рассматриваться отдельно от пространственного ограничения векторов.

Сопоставление с независимым модальным решением показывает, что разные представления дискретной системы воспроизводят практически одно и то же численное поле при общем критерии сходимости. Для сплошного цилиндра на сетке из 1024 на 1024 узла относительная ошибка поля относительно модального решения составляет около восьми десятых тысячной, а

ошибка комплексной угловой амплитуды рассеяния – около одной тысячной. Различие между решениями, полученными при полном и материальном хранении, на несколько порядков меньше этой пространственной ошибки. Тем самым подтверждается, что сокращение области хранения не заменяет контроль дискретизации и физической точности.

Полученные результаты показывают, что оптимизация памяти в задачах электромагнитного рассеяния должна учитывать несколько независимых источников затрат. Сокращение области свертки устраняет пустые узлы вокруг объекта и в рассмотренных расчетах дает наибольший общий эффект. Ограничение крыловского базиса материальной областью обеспечивает дополнительную экономию, величина которой определяется геометрией объекта и особенно возрастает при наличии внутренних пустот. Перезапуск дополнительно ограничивает объем базиса, но может увеличивать число итераций. Поэтому выбор реализации должен основываться на совместном учете размера области свертки, объема хранимого базиса, полного потребления оперативной памяти, времени решения и точности восстановленного электромагнитного поля.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Космос» ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

О. В. Салтыков
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛНОСВЯЗНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ДЕМОДУЛЯЦИИ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В СЛОЖНЫХ КАНАЛАХ СВЯЗИ

Аннотация. Исследовано применение полносвязной нейронной сети в качестве решающей схемы демодулятора бинарной частотной модуляции в нестационарных каналах (замирания, многолучевость). Проведено сравнение с классическим частотным дискриминатором. Показано, что нейросеть адаптируется к статистике канала, позволяет перейти к приёму блоками символов и обеспечивает снижение вероятности битовой ошибки. Приведены оценки выигрыша, обобщающей способности и аппаратной реализуемости.
Ключевые слова*:* нейронная сеть, демодуляция, многолучевость, замирания, машинное обучение в телекоммуникациях.
Для цитирования*:* Салтыков О. В. Использование полносвязной нейронной сети для демодуляции частотно-модулированных сигналов в сложных каналах связи // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

O. V. Saltykov
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

USE OF A FULLY CONNECTED NEURAL NETWORK FOR DEMODULATION OF FREQUENCY-MODULATED SIGNALS IN COMPLEX COMMUNICATION CHANNELS

Abstract*.* This paper explores the use of a fully connected neural network as a decision circuit for a binary frequency modulation demodulator in non-stationary channels (fading, multipath). This solution is compared with a classical frequency discriminator. It is shown that the neural network adapts to channel statistics, enables the transition to block-based reception of symbols, and reduces the bit error rate. The report provides estimates of the gain, generalization ability, and hardware feasibility.
Keywords*:* neural network, demodulation, multipath, fading, machine learning in telecommunications.
For citation*:* Saltykov O. V. Use of a fully connected neural network for demodulation of frequency-modulated signals in complex communication channels // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter: Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Актуальность. В литературе описаны различные подходы к применению нейросетей для демодуляции, например, замена традиционного тракта единой сетью с возможностью переобучения под другие виды модуляции, адаптация к конкретному многолучевому каналу, а также сквозное обучение всей системы связи как автокодировщика. Эти работы подтверждают растущий интерес к теме.

Цель работы – исследование нейросетевого демодулятора как решающей схемы для демодулятора бинарных частотно-модулированных сигналов в сложных каналах, где классический приёмник теряет оптимальность, с переходом от поэлементного приёма к приёму блоками символов и оценкой вычислительных затрат.

Методика моделирования включала три этапа:

1. Формирование выходного сигнала канала (модулятор сигнала + канал). Выборки (отдельные символы или группы до 8 символов) сохранялись с меткой истинного символа; обучающая и тестовая выборки не пересекались.

2. Обучение полносвязной нейросети методом обратного распространения с оптимизатором Adam, разбиением выборки на обучающую (80 %) и валидационную (20 %), с контролем переобучения по эпохам.

3) Тестирование (инференс) с подсчётом вероятности ошибки.

При обучении нейросети использовался метод обратного распространения ошибок, которые применяются на каждом узле (нейроне) для расчета весовых коэффициентов связей с помощью метода градиентного спуска. Соответственно, коэффициент скорости обучения также оптимизировался. Применялся оптимизатор (алгоритм) Adam, основанный на том же методе градиентного спуска, но использующий усреднение получаемых градиентов (их предысторию), чтобы меньше «сбиваться с курса» из-за воздействия шумов, а также адаптивно подстраивающий шаг градиентного алгоритма.

В качестве каналов связи использовалась модель Накагами, которая с помощью одного параметра (параметра формы) позволяет задавать бесконечное множество замирающих каналов – от самого «тяжелого» – одностороннегауссовского, через релеевский, до практически без замираний. Задавалось различное число лучей с задержками до длительности символа (так что смежные символы могли накладываться друг на друга полностью) – от одного до трех равной энергии, с доплеровским смещением в 1 Гц.

Основные результаты:

1. Энергетический выигрыш. Нейросетевой демодулятор обеспечивает выигрыш 3–10 дБ по битовому отношению сигнал/шум на многолучевых каналах относительно классического частотного дискриминатора. Максимальный выигрыш +10 дБ достигается на канале с аддитивным белым гауссовским шумом с двумя лучами и задержкой 1 мс при битовой ошибке, равной 5×10^{-2}.

2. Устранение несократимой вероятности ошибки. Преимущество метода — устранение несократимой битовой ошибки классического демодулятора, обусловленного детерминированной межсимвольной интерференцией. На каналах, где классический метод выходит на битовую ошибку ≈ 0,04–0,15, нейросеть продолжает снижать ее до 10^{-4}–10^{-5}.

3. Разложение выигрыша. Сравнение посимвольного приёма с интервальным (числом в 8 символов) показало, что основной вклад в выигрыш вносит нелинейная обработка отсчётов выхода частотного дискриминатора (2–8 дБ). Дополнительный вклад контекста соседних символов составляет 1–3 дБ на каналах с белым шумом и 0,8–1,5 дБ на рэлеевских каналах, что объясняется адаптацией сети к детерминированному отношению помеха/сигнал.

4. Универсальность к типу канала. Метод работоспособен во всём диапазоне параметра формы Накагами от 0,5 (одностороннегауссовский канал) до 1000 (белый шум). На каналах с мягкими замираниями (параметр формы = 3) выигрыш достигает +6 дБ, на каналах с белым шумом (многолучевых) – до +10 дБ, на рэлеевских каналах – до +8 дБ.

5. Обобщающая способность. Нейросеть, обученная на 8 каналах (белый шум и релеевский с различными задержками), демонстрирует хорошую обобщающую способность: на каналах с новыми задержками (3,5 мс) выигрыш составляет +3…+4 дБ, на каналах с новыми значениями параметра формы (0,5 и 3) – +2…+8 дБ, а на канале с одновременно новыми – параметром формы и задержками (3, 0,5 мс) – +5 дБ. Это подтверждает, что сеть выучила общие принципы компенсации помех.

6. Границы применимости. На простых каналах без межсимвольной интерференции (один луч) нейросеть уступает классическому демодулятору при всех значениях параметра формы, что определяет границу применимости метода. На канале параметром формы 0,5 с малой задержкой (0,5–1 мс) глубокие замирания определяют битовую

ошибку, и нейросеть также уступает классике, что указывает на принципиальное ограничение при сочетании глубоких замираний и слабого отношения помеха/сигнал.

7. Практическая реализуемость. Для трёх значений интервала анализа (1, 4, 8 символов) оценены требования к аппаратным ресурсам:

Число параметров сети: 850, 4720, 70208 соответственно.

Требуемая производительность: 0,20, 0,29, 2,18 MMAC/s.

Объём памяти (int8): 0,9, 4,8, 69 КБ.

При интервале анализа в 1 и 4 символа реализация доступна FPGA малого класса (Intel MAX 10, Xilinx Spartan-7). При интервале анализа в 8 символов требуется FPGA среднего класса (Intel Cyclone V, Xilinx Artix-7 / Zynq-7010). Производительность не является ограничивающим фактором даже для бюджетных FPGA.

8. Оптимальный выбор. Рекомендуется интервал анализа в 8 символов как оптимальный баланс сложности и эффективности: он обеспечивает максимальный энергетический выигрыш, устранение несократимой вероятности ошибки и реализуется на FPGA среднего класса. При ограниченных ресурсах приемлем интервал анализа в 4 символа, обеспечивающий близкий выигрыш при значительно меньших требованиях к памяти.

Нейросетевой демодулятор бинарного частотно-модулированного сигнала представляет собой эффективную замену классического частотного дискриминатора на каналах с межсимвольной интерференцией, обеспечивая энергетический выигрыш 3–10 дБ и устранение несократимой вероятности ошибки при реализуемости на современных FPGA.

А. С. Табакова, Д. М. Четтер, С. М. Кулясов
Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОСЦИЛЛЯТОРА ДУФФИНГА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ В УСЛОВИЯХ СТОХАСТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА

Аннотация. Представлены результаты усовершенствования алгоритма осциллятора Дуффинга, работающего в режиме стохастического резонанса. В исходном алгоритме кубическая функция была заменена комбинацией функции гиперболического тангенса и степенной функции. Это позволило ввести дополнительные параметры управления формой потенциальной функции и выполнять ее «гибкую» настройку. Введение дополнительных параметров также позволило получить различные формы кривой зависимости соотношения сигнал/шум на выходе устройства от дисперсии шума на входе. В частности, усовершенствования обеспечили возможность получения данных кривых с широкими «плато» либо, наоборот, имеющих ярко выраженные пики.
Ключевые слова: стохастический резонанс, нелинейная система, аппроксимация характеристик, осциллятор Дуффинга, гиперболический тангенс, помехоустойчивость.
Для цитирования: Табакова А. С., Четтер Д. М., Кулясов С. М. Усовершенствование алгоритма функционирования осциллятора Дуффинга с целью повышения помехоустойчивости в условиях стохастического резонанса // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. S. Tabakova, D. M. Chetter, S. M. Kulyasov
Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

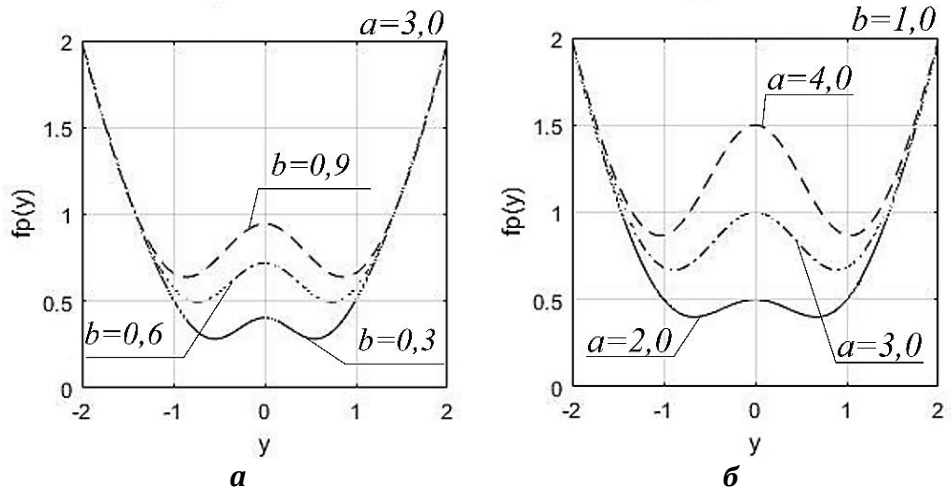
IMPROVEMENT OF THE DUFFING OSCILLATOR OPERATIONAL ALGORITHM FOR ENHANCING NOISE IMMUNITY UNDER STOCHASTIC RESONANCE CONDITIONS

Abstract. The paper presents the results of improving the Duffing oscillator algorithm operating in the stochastic resonance mode. In the original algorithm, the cubic function was replaced with a combination of the hyperbolic tangent function and a power function. This made it possible to introduce additional parameters for controlling the shape of the potential function and to perform its “flexible” adjustment. The introduction of additional parameters also made it possible to obtain various shapes of the curve describing the dependence of the signal-to-noise ratio at the device’s output on the noise variance at the input. In particular, the improvements made it possible to obtain data curves with wide “plateaus,” or, conversely, with pronounced peaks.
Keywords: stochastic resonance, nonlinear system, characteristic approximation, Duffing oscillator, hyperbolic tangent, noise immunity.
For citation: Tabakova A. S., Chetter D. M., Kulyasov S. M. Improvement of the Duffing oscillator operational algorithm for enhancing noise immunity under stochastic resonance conditions // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В соответствии с известными работами, посвященными стохастическому резонансу, осциллятор Дуффинга описывается кубическими и экспоненциальными функциями. В наиболее известном варианте представления осциллятора используются только

два параметра: *a* и *b*. Параметр *a* входит в состав кубической функции и определяет глубину «потенциальных ям». Параметр *b* используется в экспоненциальной функции и задает значение затухания, которое необходимо чтобы осциллятор обладал свойством устойчивости (т.к. осциллятор Дуффинга использует рекурсивный алгоритм функционирования).

На рис. 1 показаны формы потенциальной функции $f_p(y)$ осциллятора, где наглядно видно, что изменение параметра приводит к изменению высоты барьера, однако соотношение между глубиной ямы и крутизной стенок остается строго фиксированным (в данном случае *y* – выходной сигнал осциллятора). Таким образом, малое количество параметров исходного (классического) осциллятора Дуффинга ограничивает гибкость его работы в условиях изменяющегося шума.



а *б*

Рис. 1. *Формы потенциальной функции осциллятора Дуффинга: изменение потенциальной функции при a=const (а) и при b=const (б)*

В ходе проведенных исследований классическое представление осциллятора Дуффинга было усовершенствовано с использованием замены стандартных кубических и экспоненциальных функций другими функциями, имеющими большее количество параметров. Кубическая функция была заменена на функцию с использованием гиперболического тангенса, вместо экспоненциальной функции была использована степенная функция. В результате усовершенствованный осциллятор имеет четыре параметра (амплитудный масштабный множитель (G_0), крутизна подъема функции гиперболического тангенса (a_{th}), «ширина» степенной функции w_c, а также параметр N_b, определяющий крутизну спада степенной функции).

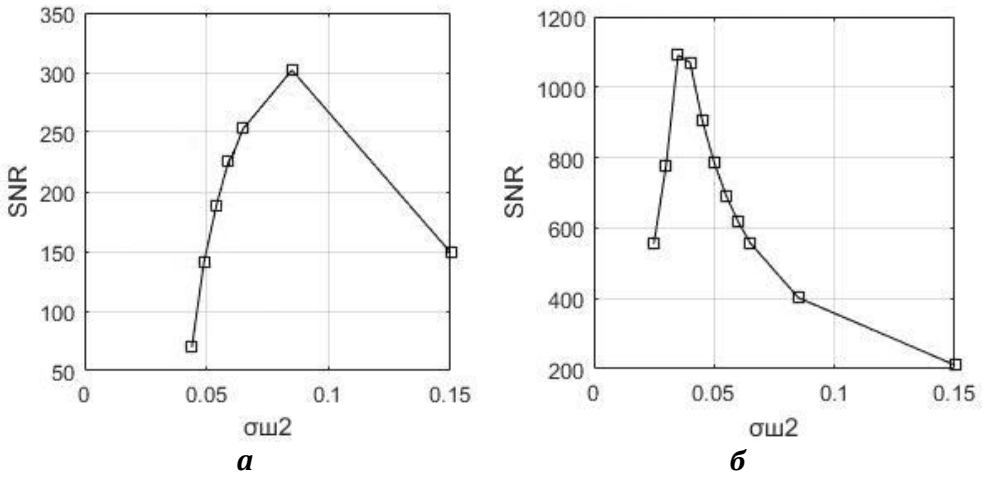
Введенная замена функций позволяет управлять «высотой барьера» потенциальной функции, а также выполнять «гибкую» настройку формы потенциальной функции. Компьютерная модель модифицированного осциллятора Дуффинга, была построена в среде Simulink пакета Matlab и далее были выполнены испытания компьютерной модели при разной интенсивности шума на входе.

В ходе экспериментальных исследований были выявлены закономерности, влияния параметров усовершенствованной модели на форму кривой помехоустойчивости модифицированного алгоритма осциллятора. Выходное отношение сигнал/шум (SNR) модифицированного осциллятора Дуффинга, исследованное при воздействии аддитивного «белого» гауссова шума, возрастает при увеличении его дисперсии $\sigma_ш^2$, достигает своего максимального значения в определенной точке, после чего наблюдается его спад.

Параметр G_0 задает максимальный уровень выходного отношения сигнал/шум. При его больших значениях резонансный пик сужается». С уменьшением этого параметра область «плато» выходной характеристики расширяется. Такое «плато» определяет диапазон значений дисперсии входного шума, в пределах которого сохраняется

условие синхронизации переходов осциллятора с внешним периодическим воздействием. Данная особенность позволяет системе сохранять заданные характеристики обработки сигнала при изменении интенсивности внешней помехи без необходимости проведения повторной настройки параметров. Параметр a_{th}, определяет «жесткость стенок» потенциальной ямы. Совместное действие параметров w_c, и N_b регулирует ширину самой «потенциальной ямы», при этом увеличение ширины ямы смещает область стохастического резонанса в сторону больших дисперсий шума.

В результате исследований найдены оптимальные конфигурации параметров усовершенствованного осциллятора, обеспечивающие сохранение условия синхронизации входного и выходного сигналов осциллятора в широком интервале интенсивности шума. Она характеризуется широкое «плато» потенциальной функции. Зависимости соотношения сигнал-шум от дисперсии шума на входе представленного рис. 2*а*. На рис. 2*б* демонстрируется резкое сужение рабочего диапазона «острый пик», что соответствует конфигурации, при которой синхронизация шум-индуцированных переходов достигается лишь в узком интервале значений дисперсии шума. Подобная настройка требует точного поддержания уровня внешних помех, поскольку даже незначительное отклонение от оптимальной точки приводит к потере резонанса и резкому падению выходного отношения сигнал/шум.



а ***б***

Рис. 2. *Зависимости соотношения сигнал-шум от дисперсии шума на входе: график с широким «плато» (а); график с узкой областью синхронизации (острый пик) (б)*

В данной работе формируется основа для создания адаптивной системы, которая в реальном времени будет анализировать шум и подстраивать свои параметры под него. Адаптивная подстройка параметров может быть использована для того, чтобы резонанс наблюдался в узком диапазоне дисперсии шума, либо, наоборот, чтобы явление резонанса соответствовало широкому диапазону.

Полученные результаты подтверждают эффективность усовершенствованного алгоритма осциллятора Дуффинга, в котором кубическая и экспоненциальная функции были заменена произведением функции гиперболического тангенса и степенной функции. Использование дополнительных параметров позволило гибко управлять формой потенциальной функции. Предложенный подход может быть использован при разработке адаптивных алгоритмов цифровой обработки сигналов, устойчивых к изменениям шумовой обстановки.

А. В. Тюкин
Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

СФЕРИЧЕСКИЙ ПРОВОДНИК В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Аннотация. Исследуется поведение сферического проводящего тела, помещённого во внешнее переменное электрическое поле промышленной частоты (50 Гц). Анализируются угловое распределение поверхностной плотности индуцированного заряда на проводящей сфере, а также возможность определения модуля и ориентации вектора напряжённости внешнего поля по результатам измерений зарядов, снимаемых с секционированных участков поверхности сферы. Рассмотрение ведётся в рамках квазистатического приближения.
Ключевые слова: проводящая сфера, электрическое поле промышленной частоты, поверхностная плотность индуцированного заряда, сферический датчик, напряжённость электрического поля.
Для цитирования: Тюкин А. В. Сферический проводник в переменном электрическом поле промышленной частоты // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. V. Tyukin
Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

SPHERICAL CONDUCTOR IN AN AC ELECTRIC FIELD OF INDUSTRIAL FREQUENCY

Abstract. This article examines the behavior of a spherical conductive body placed in an external alternating electric field of industrial frequency (50 Hz). The author analyzes the angular distribution of the surface density of the induced charge on the conductive sphere, as well as the possibility of determining the magnitude and orientation of the external field strength vector based on measurements of charges taken from sectioned areas of the sphere's surface. The analysis is carried out within the framework of the quasi-static approximation.
Keywords: conductive sphere, electric field of industrial frequency, surface charge density of induced charge, spherical sensor, electric field strength.
For citation: Tyukin A. V. Spherical conductor in an AC electric field of industrial frequency // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter: Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Задача о поведении проводящей сферы во внешнем электрическом поле относится к числу классических задач электродинамики. На её решении базируются принципы работы датчиков напряжённости электрического поля, в конструкции которых используется проводящая сфера. Такие датчики регистрируют перераспределение поверхностного заряда, индуцируемого внешним полем.

Экспериментально подтверждено, что плотность индуцированного заряда на проводящей сфере помещённой в электрическое поле изменяется по закону $\sigma(\theta) \sim cos\ \theta$ (где θ - угол между направлением поля и радиус-вектором). Именно распределение поверхностного заряда определяет, как структуру внешнего электрического поля, так и величину наведённых токов в проводнике.

Следует учитывать, что электрическое поле промышленной частоты в общем случае неоднородно. Для случая переменного поля промышленной частоты (50 Гц) решение задач приобретает ряд специфических черт, связанных с квазистатическим характером процессов, что оказывает влияние на перераспределение свободных зарядов по поверхности проводника.

Квазистатический характер процессов при построении датчиков напряженности электрического поля используется, поскольку характерные размеры системы (радиус проводящей сферы датчика) значительно меньше длины электромагнитной волны, что позволяет пренебречь эффектами запаздывания. В этих условиях переменное поле изменяется достаточно медленно, и его распределение в каждый момент времени можно считать синхронным с изменениями источников, а током смещения в проводнике можно пренебречь по сравнению с током проводимости.

В квазистатическом приближении, а также при условии, что размеры рассматриваемой области много меньше расстояния до источника и характерного масштаба неоднородности поля, переменное поле промышленной частоты в ограниченной области пространства можно приближённо считать однородным. Данное приближение справедливо при соблюдении двух условий: размеры объекта малы по сравнению с расстоянием до источника и характерным масштабом изменения поля; погрешность измерений не превышает величину относительной неоднородности. Для инженерных задач, например, при удалении от линии электропередачи более чем на 10 м, погрешность составляет менее 5 %, что позволяет использовать модель однородного поля.

Вид углового распределения поверхностной плотности индуцированного заряда на проводящей сфере, изменяющегося по косинусоидальному закону, помещённой в переменное электрическое поле, представлен на (рис. 1).

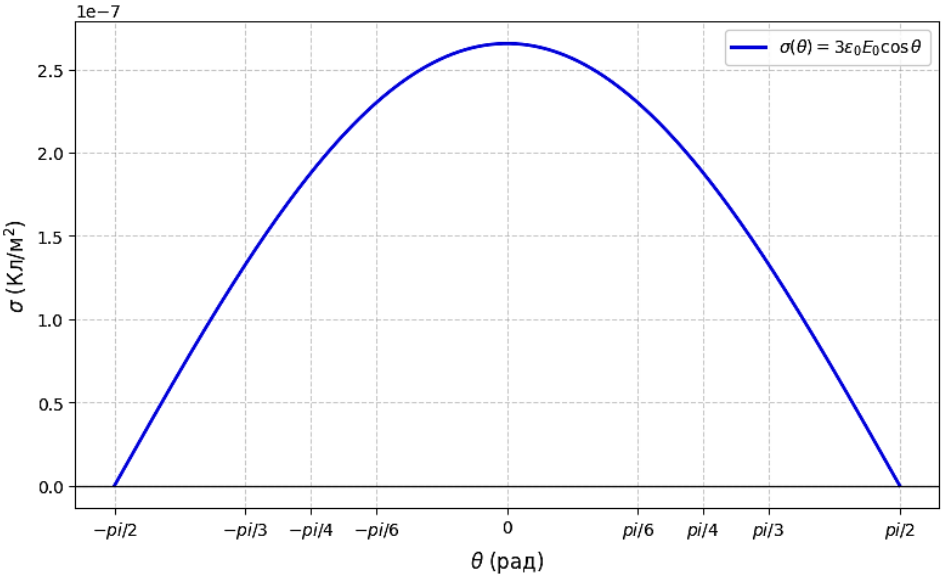


Рис. 1. *Поверхностная плотность заряда на проводящей сфере*

Из анализа графика зависимости следует, что максимальное значение поверхностной плотности индуцированного заряда достигается при угле θ = 0 рад. Значение поверхностной плотности заряда в данной области сферической поверхности в 3 раза превышает соответствующее значение в остальных её частях.

Как было отмечено выше, распределение поверхностного заряда позволяет определить структуру, модуль и ориентацию вектора напряжённости внешнего поля, в которое помещена проводящая сфера. В силу линейной связи поверхностной плотности заряда с напряжённостью внешнего электрического поля, измерение заряда на каждом из

секционированных участков поверхности проводящей сферы даёт возможность определить, как абсолютное значение вектора напряжённости, так и его пространственную ориентацию.

Разбиение поверхности проводящей сферы на секционные участки позволило создать электроиндукционный сдвоенный сферический датчик (рис. 2).

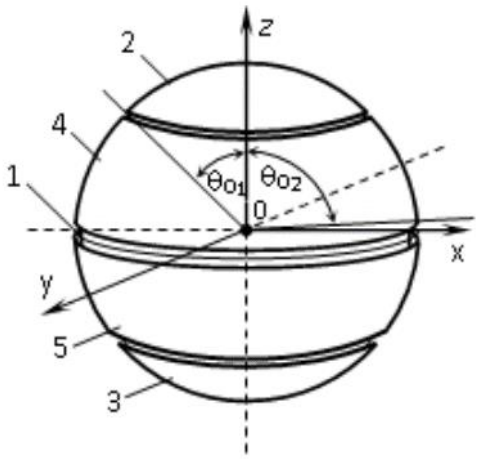


Рис. 2. *Электроиндукционный сдвоенный сферический датчик*

Разработанный сдвоенный однокоординатный сферический датчик напряжённости электрического поля содержит два идентичных измерительных узла. Конструктивно каждый узел включает проводящее сферическое основание 1 и две пары чувствительных элементов 2–3 и 4–5, размещённых на общей координатной оси *z*. Элементы изолированы друг от друга и от поверхности основания. Первая пара (2–3) представляет собой сферические сегменты с угловым размером 45°, вторая пара (4–5) - сферические слои с угловыми размерами в диапазоне от 45° до 90°.

В связи с тем, что элементы 2–3 завышают, а элементы 4–5 занижают измеряемую напряжённость электрического поля, в данном сферическом датчике применяется метод расчёта напряжённости как среднего от показаний пар чувствительных элементов.

В заключении статьи можно сделать следующие выводы.

1. В квазистатическом приближении, справедливом для промышленной частоты 50 Гц, поверхностная плотность индуцированного заряда на проводящей сфере подчиняется косинусоидальному закону. Это позволяет по распределению заряда на её секционированных участках определять, как модуль, так и ориентацию вектора напряжённости внешнего электрического поля.

2. На основе установленного распределения поверхностной плотности заряда разработан сдвоенный сферический датчик напряжённости электрического поля, содержащий две пары чувствительных элементов. Выбранные форма, угловые размеры чувствительных элементов, а также усреднение показаний пар позволяют компенсировать систематические погрешности измерений.

3. Несмотря на общую неоднородность поля промышленной частоты, предложенная конструкция датчика, размеры которого значительно меньше расстояния до источника, обеспечивает возможность определения как значения, так и пространственной ориентации вектора напряжённости.

Чжао Хунли[1], Я. А. Илюшин[1,2]
[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Москва, Российская Федерация
[2]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Москва, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ УЗКОНАПРАВЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ В ПРИЗЕМНОМ ТУМАНЕ

Аннотация. Рассматривается численное моделирование световых полей узколучевых направленных источников в рассеивающих средах методами теории переноса излучения. Обсуждаются ограничения существующих аналитических и численных подходов, включая метод Монте-Карло. Предложен более экономичный подход на основе метода последовательных кратностей рассеяния. Приведены примеры расчёта углового распределения лазерного излучения в тумане при сильно вытянутой вперёд индикатрисе рассеяния. Обсуждаются возможные приложения результатов исследования, в том числе к созданию лазерных систем посадки самолётов.
Ключевые слова*:* перенос излучения, лазер, туман, индикатриса рассеяния.
Для цитирования*:* Чжао Хунли, Илюшин Я. А. Моделирование световых полей узконаправленных источников в приземном тумане // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

Zhao Hongli[1], Ya. A. Ilyushin[1,2]
[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
[2]Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS
Moscow, Russian Federation

MODELING OF LIGHT FIELDS FROM HIGHLY DIRECTIONAL SOURCES IN GROUND-LEVEL FOG

Abstract*.* The paper examines the numerical modeling of light fields of narrow-beam directional sources in scattering media using the methods of the theory of radiative transfer. The limitations of existing analytical and numerical approaches, including the Monte Carlo method, are discussed. A more economical approach based on the method of successive scattering multiples is proposed. Examples are given of calculating the angular distribution of laser radiation in fog with a strongly elongated scattering indicatrix. Possible applications of the research results are discussed, including the creation of laser aircraft landing systems.
Keywords*:* radiative transfer, laser, fog, scattering phase function
For citation*:* Zhao Hongli, Ilyushin Ya. A. Modeling of light fields from highly directional sources in ground-level fog // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Целью данного исследования является разработка и развитие техники моделирования световых полей узколучевых направленных источников в рассеивающих средах численными методами теории переноса излучения. Ожидается, что это позволит значительно сократить разрыв между уровнем развития инструментальных средств измерения рассеянных световых полей и средствами численного моделирования таких измерений.

В зависимости от требований к точности моделирования и детализации решения, то есть разрешающей способности по углам и координатам, для решения уравнения переноса излучения могут применяться различные численные схемы с огрублением структуры поля излучения в среде, в том числе с аподизацией особенностей. Детальные обзоры опубликованных работ по этой теме можно найти в научной литературе.

Для многих природных сред в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах характерны сильно вытянутые вперёд индикатрисы рассеяния. К таким средам относятся атмосферные аэрозоли, облака, туманы, морские воды, биологические ткани и другие. В таких средах значительный вклад в общее световое поле источника вносит излучение, многократно рассеянное на малые углы. Уравнение переноса излучения при этом может быть эффективно решено в малоугловом приближении.

Аналитические решения задачи рассеяния направленного пучка фотонов или частиц в среде известны с середины XX века. В последующих работах решения для поля точечного мононаправленного источника представлялись как сумма нерассеянного излучения и малоуглового рассеяния вперёд.

Однако численная реализация этих решений не позволяет достичь углового разрешения, сопоставимого с возможностями современных регистрирующих приборов. Даже при использовании десятков тысяч сферических гармоник достигается разрешение лишь порядка нескольких градусов, что значительно хуже характеристик современных матричных оптических сенсоров.

Практически необходимым разрешением на сегодняшний день обладают только статистическое моделирование, то есть метод Монте-Карло, и метод последовательных кратностей рассеяния.

Недостатком метода Монте-Карло является статистическая природа ошибки и медленная сходимость. Метод последовательных кратностей требует вычисления многократных интегралов и значительных вычислительных ресурсов.

В данной работе предложен рациональный экономичный подход на основе метода последовательных кратностей рассеяния, позволивший рассчитать угловые распределения интенсивности до четвёртой кратности рассеяния включительно.

На рис. 1 представлена принципиальная схема лазерной системы посадки самолёта. На схеме показаны конечный этап захода на посадку, высота принятия решения, глиссада, луч лазера, участок касания и взлётно-посадочная полоса, а также характерные расстояния и высоты.

Рис. 1. *Лазерная система посадки самолета*

На рис. 2 приведен пример численного расчёта углового распределения интенсивности излучения лазерного маяка посадочной системы в тумане. Использована индикатриса рассеяния Хэньи–Гринстейна с сильно вытянутой вперёд формой. Указаны расходимость луча, расстояние до оси лазерного луча и расстояния до источника излучения.

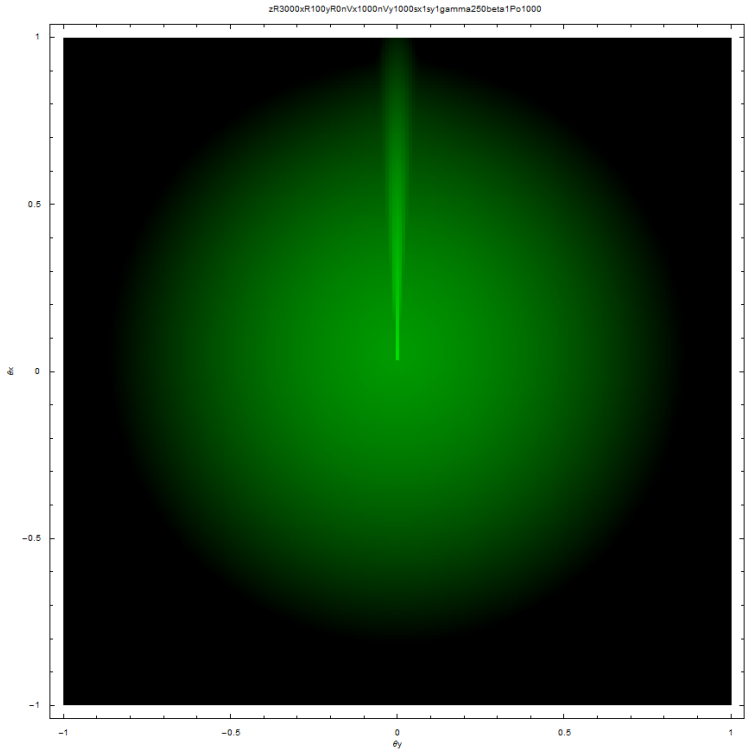


Рис. 2. *Пример численного расчета углового распределения интенсивности лазерного излучения в тумане. Индикатриса рассеяния Хэньи-Гринстейна, g=0,9. Расходимость луча 1 мрад. Оптические расстояния до оси лазерного луча и до источника излучения τ_R=0,1 и τ_Z =3 соответственно*

Исследование выполнено в рамках государственного задания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

А. С. Юрков
Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СПИРАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕРДЕЧНИКОМ

Аннотация. Рассматривается спиральный волновод с малым шагом витков, заполненный диэлектрической средой. Обмотка приближенно заменяется поверхностью с анизотропной проводимостью. Обсуждается получение уравнений, определяющих коэффициент замедления и волновое сопротивление. Предложен метод численного решения этих уравнений в общем случае, а также аналитическое решение в предельном случае низких частот.
Ключевые слова*:* электродинамика, диэлектрик, спиральный волновод, волновое сопротивление, коэффициент замедления.
Для цитирования*:* Юрков А. С. Электродинамика спирального волновода с диэлектрическим сердечником // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. S. Yurkov
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

ELECTRODYNAMICS OF A HELICAL WAVEGUIDE WITH A DIELECTRIC CORE

Abstract*.* The paper considers a helical waveguide with a small winding pith and a dielectric core. The winding is approximately replaced by a surface with anisotropic conductivity. The paper also discusses the derivation of the equations determining the slowing factor and wave impedance. The author proposes a method for their numerical solution in the general case, as well as an analytical solution for the low-frequency limit.
Keywords*:* electrodynamics, dielectric, helical waveguide, wave impedance, slowing factor.
For citation*:* Yurkov A. S. Electrodynamics of a helical waveguide with a dielectric core // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Спиральные волноводы широко используются в радиотехнике, так что электродинамика таких структур без сомнения представляет определенный интерес. Строгое аналитическое решение электродинамической задачи для такого волновода невозможно. Однако в частном случае малого шага витков известно приближение, при котором витки заменяются поверхностью с анизотропной проводимостью: бесконечной вдоль витков и нулевой поперек. В известных работах такое рассмотрение спирального волновода проводилось только для случая, когда внутри и вне волновода одинаковая среда. Данная работа восполняет этот пробел: рассматривается случай, когда внутри спирали диэлектрическая и магнитная проницаемости отличны от тех, что снаружи.

Хорошо известно, что если зависимость от одной из координат (пусть это z) имеет

вид e^{-jkz}, в частности в случае волновода, поперечные компоненты как магнитного, так и продольного поля выражаются через соответствующие продольные компоненты. Исключением является лишь случай Т-волны, который нас здесь не интересует. Продольные компоненты удовлетворяют двумерным уравнениям Гельмгольца, которые могут быть решены методом Фурье.

Записав соответствующие формулы и применив граничные условия на анизотропной поверхности, можно получить уравнение, определяющее коэффициент замедления ξ. Судя по всему, это уравнение может быть решено только численными методами. Наиболее походящим численным методом в данном случае является метод деления отрезка пополам. На рис. 1 в качестве примера приведены результаты такого решения.

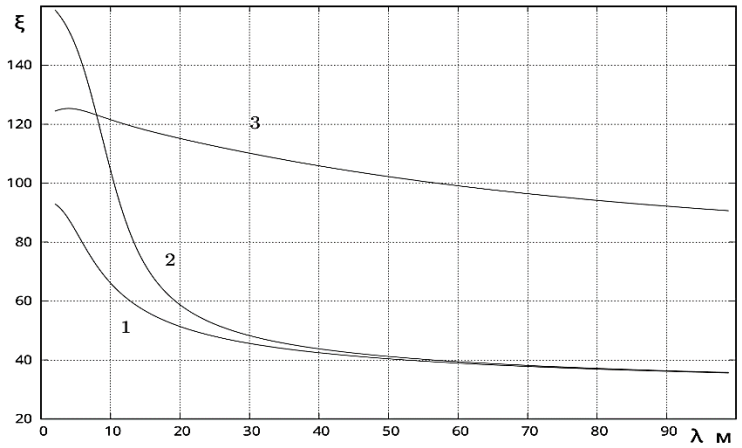


Рис. 1. *Коэффициент замедления* $\boldsymbol{\xi}$ *в зависимости от длины волны* $\boldsymbol{\lambda}$ *для волновода диаметром 30 мм, с шагом обмотки 1 мм. 1:* $\boldsymbol{\varepsilon = \mu = 1}$*; 2:* $\boldsymbol{\varepsilon = 5, \mu = 1}$*; 3:* $\boldsymbol{\varepsilon = 1, \mu = 5}$

Волновое сопротивление W определяется через переносимую волной мощность $P = WI^2/2$, где I – текущий по обмотке ток. Мощность P можно определить, интегрируя продольную компоненту вектора Пойнтинга. В результате получается формула, слишком громоздкая, чтобы ее здесь приводить. На рис. 2 приведен график вычислений по этой формуле для примера, указанного выше.

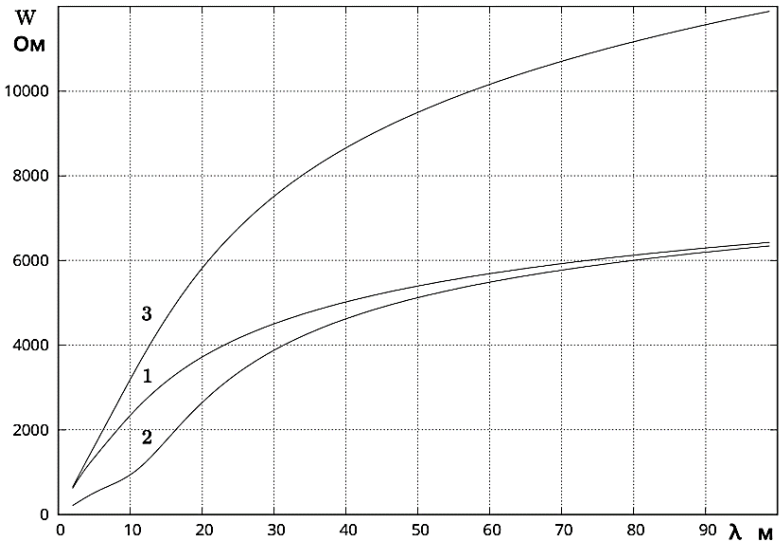


Рис. 2. *Волновое сопротивление* $\boldsymbol{W}$ *в зависимости от длины волны* $\boldsymbol{\lambda}$ *для волновода диаметром 30 мм, с шагом обмотки 1 мм. 1:* $\boldsymbol{\varepsilon = \mu = 1}$*; 2:* $\boldsymbol{\varepsilon = 5, \mu = 1}$*; 3:* $\boldsymbol{\varepsilon = 1, \mu = 5}$

Обращает на себя внимания тот факт, что, как видно из приведенных графиков, для больших длин волн остается только зависимость параметров волновода от магнитной проницаемости μ, а зависимость от диэлектрической проницаемости ε исчезает. Для того, чтобы теоретически понять этот факт, был проведен анализ рассмотренной теории в асимптотическом длинноволновом пределе. Здесь возможны два подхода: первый – заменить входящие в формулы цилиндрические функции их асимптотическим выражениями, второй, менее строгий, – рассмотреть поверхность волновода как поверхность соленоида с соответствующим индуктивным поверхностным сопротивлением. Как оказалось, оба эти варианта дают одинаковые итоговые формулы, что является обоснованием второго из них. Во втором варианте, очевидно, что играет роль магнитная проницаемость (она влияет на индуктивность соленоида) и не влияет диэлектрическая проницаемость (от нее индуктивность не зависит). Тем самым указанное выше наблюдение получает свое естественное теоретическое обоснование. Также в длинноволновой асимптотике можно получить формулы, которые радикально проще, чем упомянутые выше. Конечно, эти формулы имеют более узкую область применимости, они справедливы только для достаточно низких частот.

Таким образом, электродинамическое рассмотрение спирального волновода, заполненного внутри диэлектриком, даже в приближении анизотропной поверхности, приводит к крайне громоздким формулам и уравнениям, определяющим коэффициент замедления и волновое сопротивление. Тем не менее указанные уравнения могут быть решены численно методом деления отрезка пополам. На частном примере такое решение показало, что в низкочастотном (длинноволновом) пределе параметры волновода зависят от магнитной проницаемости заполнения, и не зависят от его диэлектрической проницаемости. Развито асимптотическое длинноволновое приближение, которое хоть и имеет более узкую область применимости, но объясняет указанный факт и дает радикально более простые формулы, применяя которые можно обойтись уже непосредственными арифметическими вычислениями.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

В. И. Алексеенков, А. А. Вялов, А. В. Груша, М. М. Гаврилов
П. В. Куприянов, М. В. Лебедев, С. С. Семенюк, С. А. Силаев, Е. В. Терешкин
АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино, Россия

ГЕРМЕТИЧНЫЕ МИКРОМОДУЛИ СВЧ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА НА ОСНОВЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСОВ

Аннотация. Показана возможность создания многофункциональных микромодулей на основе специализированных СВЧ-корпусов из отечественного стеклокерамического материала и отечественных монолитных интегральных схем СВЧ, устраняющая недостатки традиционного подхода, при котором корпусирование кристаллов в металлический корпус ухудшает электрические параметры радиоэлектронного устройства СВЧ, увеличивает габариты и ограничивает его миниатюризацию. В настоящей работе предложено объединение набора бескорпусных монолитных интегральных схем СВЧ и пассивных компонентов собственного производства в едином безвыводном герметизируемом корпусе для поверхностного монтажа, изготавливаемом по технологии низкотемпературной керамики. Такое решение обеспечивает гибкую архитектуру, уменьшение массогабаритных характеристик и расширение рабочего диапазона частот до 40 ГГц. Представлены результаты разработки СВЧ-корпуса до 40 ГГц, а также результаты создания многофункциональных микромодулей.

Ключевые слова: многофункциональный микромодуль; СВЧ-корпус; МИС СВЧ; SMD-монтаж; LTCC; герметизация; стеклокерамика; АФАР.

Для цитирования: Алексеенков В. И., Вялов А. А., Груша А. В., Гаврилов М. М., Куприянов П. В., Лебедев М. В., Семенюк С. С., Силаев С. А., Терешкин Е. В. Герметичные микромодули СВЧ для поверхностного монтажа на основе отечественных монолитных интегральных схем и стеклокерамических корпусов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции. Омск : ОНИИП, 2026.

V. I. Alekseenkov, A. A. Vyalov, A. V. Grusha, M. M. Gavrilov
P. V. Kupriyanov, M. V. Lebedev, S. S. Semenyuk, S. A. Silaev, E. V. Tereshkin
JSC "NPP "Istok" named after Shokin", Fryazino, Russia

HERMETIC SURFACE-MOUNT MICROWAVE MICROMODULES BASED ON DOMESTIC MONOLITHIC I NTEGRATED CIRCUITS AND GLASS-CERAMIC PACKAGES

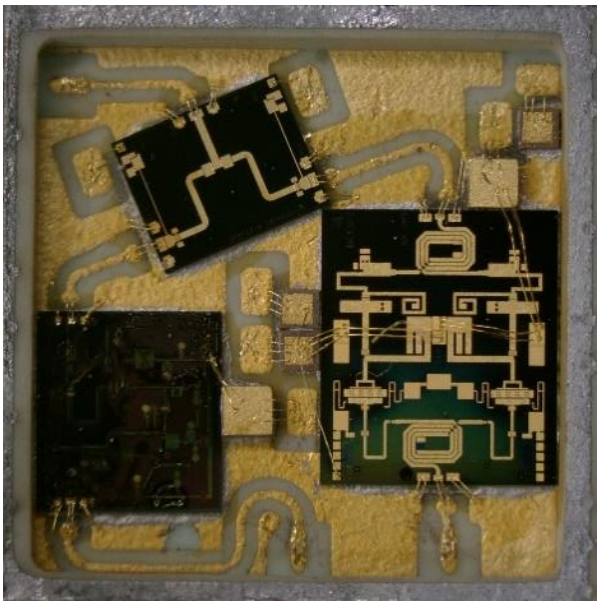
Abstract. This paper demonstrates the feasibility of creating multifunctional micromodules based on specialized microwave packages made of domestic glass-ceramic material and domestic monolithic microwave integrated circuits, overcoming the drawbacks of the conventional approach, in which packaging dies into a metal housing degrades the electrical parameters of microwave radioelectronic equipment, increases its size, and limits its miniaturization. This paper proposes com-

bining a set of in-house bare-die monolithic microwave integrated circuits and passive components within a single hermetic QFN-type surface-mount package manufactured using low-temperature co-fired ceramic technology. This solution provides a flexible architecture, reduced size and weight, and an extended operating frequency range up to 40 GHz. Results of designing the microwave package for operation up to 40 GHz are presented, along with results of creating the multifunctional micromodules.
Keywords: multifunctional micromodule; microwave package; microwave MMIC; SMD mounting; LTCC; hermetic sealing; glass-ceramics; AESA.
For citation: Alekseenkov V. I., Vyalov A. A., Grusha A. V., Gavrilov M. M., Kupriyanov P. V., Lebedev M. V., Semenyuk S. S., Silaev S. A., Tereshkin E. V. Study of the Feasibility of Creating Multifunctional Leadless Hermetic Micromodules Based on Domestic Specialized Microwave Packages and Microwave MMICs for Promising AESA Transceiver Modules and Infradyne Converters // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Корпусирование монолитных интегральных схем СВЧ в стандартные корпуса для поверхностного монтажа неизбежно ухудшает электрические параметры кристалла и увеличивает его габариты. Кроме того, сборка отдельно корпусированных монолитных интегральных схем СВЧ на плату с последующей установкой в металлический корпус модуля ограничивает возможности миниатюризации радиоэлектронного устройства СВЧ. В настоящей работе исследуется возможность создания многофункциональных отечественных микромодулей на основе СВЧ-корпусов из стеклокерамического материала и монолитных интегральных схем СВЧ. Корпуса таких схем должны обеспечивать:

– защиту кристалла от внешних воздействующих факторов;
– удобство монтажа кристалла в корпус;
– сохранение расчётных электрических параметров кристалла в широком диапазоне частот;
– удобство монтажа самого корпуса на печатную плату.

Особенностью работы является объединение заданного набора бескорпусных монолитных интегральных схем СВЧ и пассивных СВЧ-компонентов собственного производства в едином безвыводном герметизируемом корпусе для поверхностного монтажа (см. рисунок).



Внешний вид многофункционального микромодуля

Корпус изготавливается из стеклокерамического материала собственного производства по технологии низкотемпературной керамики. Такое решение обеспечивает гибкую архитектуру многофункциональных микромодулей на основе универсальных монолитных интегральных схем СВЧ. Оно также обеспечивает оптимальную электродинамическую связь между схемами без потерь на промежуточных переходах. Кроме того, достигается уменьшение массогабаритных характеристик по сравнению с модулями на корпусированных монолитных интегральных схемах СВЧ. Дополнительно обеспечивается 3D-интеграция пассивных компонентов в объёме корпуса и расширение рабочего диапазона частот многофункциональных микромодулей до 40 ГГц.

Конструктивно многофункциональный микромодуль представляет собой керамический корпус для поверхностного монтажа. В основании корпуса сформированы проводящие СВЧ-линии передачи и пассивные элементы. На верхнем слое методом автоматизированной сборки монтируются бескорпусные монолитные интегральные схемы СВЧ и пассивные чип-компоненты. Герметизация обеспечивается креплением крышки к корпусу сваркой, пайкой или приклеиванием. Монтаж многофункционального микромодуля на печатную плату выполняется по обычной технологии поверхностного монтажа. Такой подход исключает необходимость в дополнительном металлическом корпусе.

Внедрение технологии позволяет отказаться от трудоёмкой индивидуальной ручной сборки и настройки электрических параметров радиоэлектронных устройств СВЧ. Это снижает себестоимость производства и повышает серийность продукции. Одновременно достигается радикальное улучшение массогабаритных и электрических характеристик радиоэлектронных устройств СВЧ. В сообщении представлены результаты проектирования, сборки и измерения электрических параметров многофункциональных микромодулей. Эти результаты создают задел для последующих ОКР по созданию серийных малогабаритных герметичных микромодулей для перспективной радиоэлектронной аппаратуры СВЧ.

Л. Т. Ануарова[1], Д. А. Ермаков[1], Д. В. Холодняк[1], А. И. Тюменцев[2], А. Н. Яковлев[2]
[1]Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]Омский научно-исследовательский институт приборостроения Омск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ УЗКОПОЛОСНЫХ ИНВЕРТОРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ДИАПАЗОН ЧАСТОТНОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ПОЛОСОВЫХ LC-ФИЛЬТРОВ

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния коэффициента преобразования узкополосных инверторов сопротивления на диапазон частотной перестройки полосового LC-фильтра, реализованного на последовательных колебательных контурах с индуктивными связями. Установлено, что при перестройке емкостей контуров такого фильтра его частотные характеристики существенно зависят от значений коэффициента преобразования инверторов сопротивления. Показана возможность увеличения диапазона частотной перестройки полосового LC-фильтра на последовательных контурах за счет выбора коэффициента преобразования узкополосных инверторов сопротивления.
Ключевые слова: полосовой LC-фильтр, перестройка по частоте, коэффициент преобразования, инвертор сопротивления.
Для цитирования: Ануарова Л. Т., Ермаков Д. А., Холодняк Д. В., Тюменцев А. И., Яковлев А. Н. Влияние коэффициента преобразования узкополосных инверторов сопротивления на диапазон частотной перестройки полосовых LC-фильтров // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

L. T. Anuarova[1], D. A. Ermakov[1], D. V. Kholodnyak[1], A. I. Tyumentsev[2], A. N. Yakovlev[2]
[1]Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russian Federation
[2]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

IMPACT OF THE PARAMETER OF NARROWBAND IMPEDANCE INVERTERS ON TUNABILITY OF BANDPASS LC-FILTERS

Annotation. Results of a study on impact of the parameter of narrowband impedance inverters on tunability of a bandpass LC-filter on series resonant tanks with inductive couplings are presented. It is shown that the frequency characteristics of such a filter depend significantly on the inverter parameter value when the LC-tank capacitors are altered. A possibility to enhance tunability of a bandpass filter on series LC-tanks by properly choosing the parameter values of narrowband impedance inverters is demonstrated.
Keywords: bandpass LC-filter, tunability, inverter parameter, impedance inverter.
For citation: Anuarova L. T., Ermakov D. A., Kholodnyak D. V., Tyumentsev A. I., Yakovlev A. N. Impact of the parameter of narrowband impedance inverters on tunability of bandpass LC-filters // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Способность перестраиваемых полосовых LC-фильтров изменять частоту настройки обуславливает их использование во входных цепях современных радиоприемных устройств, которые работают в режимах псевдослучайной перестройки рабочей

частоты и в условиях воздействия помех. Наряду с избирательностью и уровнем вносимых потерь одним из важнейших параметров таких фильтров является коэффициент перестройки, характеризующий диапазон частот, в пределах которого фильтр сохраняется заданные частотные характеристики.

Основной причиной отклонения частотных характеристик фильтров при их перестройке является изменение сопротивления двухполюсников, входящих в состав схемы фильтра, что ведет к рассогласованию. При этом отклонения тем больше, чем в больших пределах происходит перестройка фильтра по частоте.

Для увеличения коэффициента перестройки полосовых LC-фильтров в настоящее время применяются методы, обеспечивающие постоянство входного сопротивления фильтров при их перестройке по частоте. Однако реализация этих методов требует введения дополнительных управляющих элементов, что применимо далеко не ко всем схемам фильтров, или же использования согласующих ФНЧ с регулируемой частотой среза, что усложняет конструкцию полосового фильтра.

Наибольший практический интерес представляют схемы частотно-перестраиваемых половых фильтров с постоянной относительной полосой пропускания, которые содержат минимальное число управляющих элементов и перестраиваются с помощью изменения емкостей колебательных контуров. Схема двухзвенного полосового фильтра с переменными емкостями контуров и индуктивными связями изображена на рис. 1*а*. Рассматриваемая схема может быть получена преобразованием канонической лестничной схемы двухзвенного полосового фильтра (рис. 1*б*) с помощью инверторов сопротивления, как показано на рис. 1*в*. Для реализации внутреннего и внешних инверторов сопротивления используются индуктивные схемы, представленные на рис. 1*г, д.* Значения элементов схемы перестраиваемого фильтра, полученного с помощью такого преобразования, могут оказаться трудно реализуемыми на практике. Эта проблема может быть решена путем выбора надлежащих значений коэффициента преобразования инверторов сопротивления (*K*).

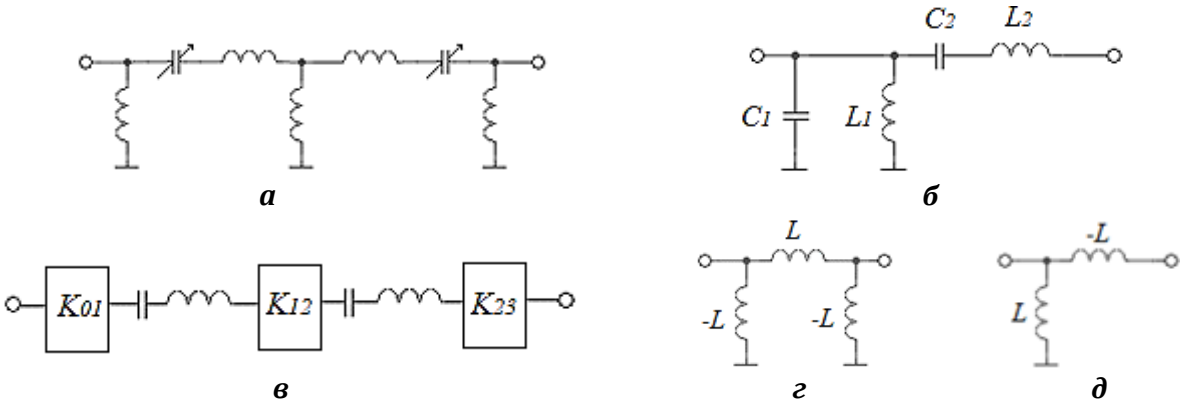


Рис. 1*. а) схема двухзвенного полосового перестраиваемого LC-фильтра с индуктивными связями; б) исходная лестничная схема двухзвенного полосового фильтра; в) преобразование лестничной схемы с помощью инверторов сопротивления; г) индуктивная схема внутреннего инвертора сопротивления; д) индуктивная схема внешнего инвертора сопротивления*

Проведем оценку влияния значений коэффициента преобразования инверторов сопротивления на перестройку полосового LC-фильтра. При этом будем полагать, что потерями и паразитными реактивностями элементов можно пренебречь. На графиках рис. 2 приведены расчетные зависимости коэффициента передачи по мощности (S21) и отражения (S11) от частоты для двухзвенного полосового фильтра с характеристикой Чебышева с относительной шириной полосы пропускания 10% и начальной центральной частотой 20 МГц при его перестройке по частоте и различных значениях коэффициента преобразования внешних инверторов сопротивления.

Как следует из представленных результатов, если задаться требованиями, чтобы при перестройке изменение коэффициента передачи по мощности в полосе пропускания фильтра составляло не более 1,0 дБ, а значение коэффициента отражения не превышало –15 дБ, то при коэффициенте преобразования внешних инверторов равном 30 Ом коэффициент перестройки фильтра, изображенного на рис. 1*а*, будет менее 1,5, а при коэффициенте преобразования 100 Ом – не более 2,0. В то же время при коэффициенте преобразования инверторов равном 60 Ом коэффициент перестройки фильтра составит не менее 4,0.

При этом следует отметить, что выбор значения коэффициента преобразования инверторов оказывает существенное влияние на характер АЧХ фильтра при его перестройке. Так при выборе коэффициента преобразования внешних инверторов сопротивления меньше значения, при котором обеспечивается максимальный коэффициент перестройки, вносимые потери и КСВ фильтра при перестройке вверх по частоте будут увеличиваться. В свою очередь, при бóльших значениях коэффициента преобразования и такой же перестройке будут увеличиваться неравномерность коэффициентов передачи и отражения.

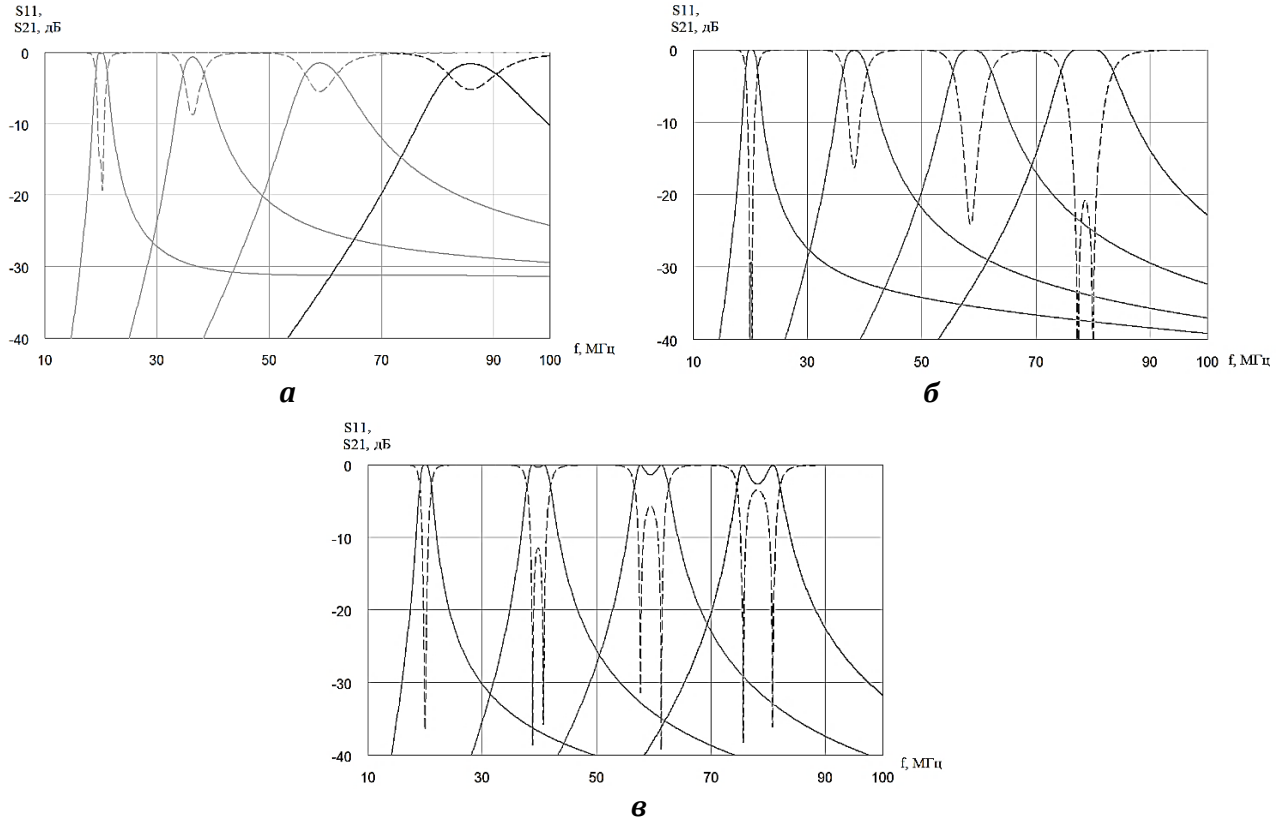


***Рис. 2**. Частотные зависимости коэффициентов передачи (сплошная линия) и отражения (пунктирная линия) двухзвенного полосового LC-фильтра при перестройке по частоте для различных значений коэффициента преобразования внешних инверторов сопротивления: а) $K_{01} = K_{23} = 30$ Ом; б) $K_{01} = K_{23} = 60$ Ом; в) $K_{01} = K_{23} = 100$ Ом*

Проведенные исследования влияния коэффициента преобразования инверторов сопротивления на перестройку полосового LC-фильтра, выполненного на последовательных контурах с индуктивными связями, показали, что надлежащий выбор значения коэффициента преобразования внешних инверторов позволяет увеличить диапазон перестройки такого фильтра не менее, чем в 2,0–2,5 раза при сохранении относительной ширины полосы пропускания и приемлемой неравномерности АЧХ без применения дополнительных управляющих элементов или согласующих ФНЧ с регулируемой частотой среза.

А. О. Афонин[1,2], И. В. Говорун[1,3], М. Ю. Горн[1,3], Ал. А. Лексиков[1], А. В. Угрюмов[1,2]
[1]Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН
Красноярск, Российская Федерация
[2]АО «НПП «Радиосвязь», Красноярск, Российская Федерация
[3]Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация

ВОЛНОВОДНЫЙ ФИЛЬТР С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВСТАВКАМИ В Е-ПЛОСКОСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Аннотация. Представлена конструкция волноводного полосно-пропускающего фильтра 10-го порядка с металлическими вставками в Е-плоскости. В программе трехмерного электродинамического моделирования проведено исследование влияния размеров вставки на величину коэффициента связи. Разработана электромагнитная модель полосно-пропускающего фильтра с полосой пропускания равной 54 МГц и центральной частотой f_c=10981,25 МГц.
***Ключевые слова**:* волноводный полосно-пропускающий фильтр, металлические вставки в Е-плоскости, коэффициент связи, спутниковая связь
***Для цитирования**:* Афонин А. О., Говорун И. В., Горн М. Ю., Лексиков Ал. А., Угрюмов А. В. Волноводный фильтр с металлическими вставками в Е-плоскости для применения в системах космической связи // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. O. Afonin[1,2], I. V. Govorun[1,3], M. Yu. Gorn[1,3], Al. A. Leksikov[1], A. V. Ugryumov[1,2]
[1]Kirensky Institute of Physics, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation
[2]JSC “NPP “Radiosvyaz”, Krasnoyarsk, Russian Federation
[3]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

WAVEGUIDE FILTER WITH METALLIC INSERTS IN THE E-PLANE FOR SPACE COMMUNICATION SYSTEMS

Annotation. A 10th-order waveguide band-pass filter with metallic inserts in the E-plane is presented. Electromagnetic simulation was performed, and the influence of insert dimensions on the coupling coefficient was studied. A bandwidth of 54 MHz was obtained at a center frequency of 10981.25 MHz.
***Keywords**:* waveguide filter, band-pass filter, metallic inserts in E-plane, coupling coefficient, satellite communication, electromagnetic simulation
***For citation**:* Afonin A. O., Govorun I. V., Gorn M. Yu., Leksikov Al. A., Ugryumov A. V. Waveguide filter with metallic inserts in the E-plane for space communication systems // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В системах космической связи к частотно-селективным устройствам предъявляются жесткие требования по габаритам, потерям в полосе пропускания, избирательности и электрической прочности. Применение волноводных полосно-пропускающих фильтров с металлическими вставками в Е-плоскости в таких системах позволяет удовлетворить этим требованиям. Такие конструкции фильтров отличаются сравнительной технологичностью и легкостью настройки, что делает их перспективными для применения в системах космической связи.

Целью работы является разработка волноводного полосно-пропускающего фильтра 10-го порядка с металлическими вставками в Е-плоскости. Конструкция фильтра построена по схеме 10-4-4, обеспечивающей формирование 4 полюсов затухания на частотной зависимости прямых потерь и 4 полюсов на характеристике группового времени запаздывания в полосе пропускания. В ходе трехмерного электродинамического моделирования была получена модель разработанного фильтра, приведенная на рис. 1.

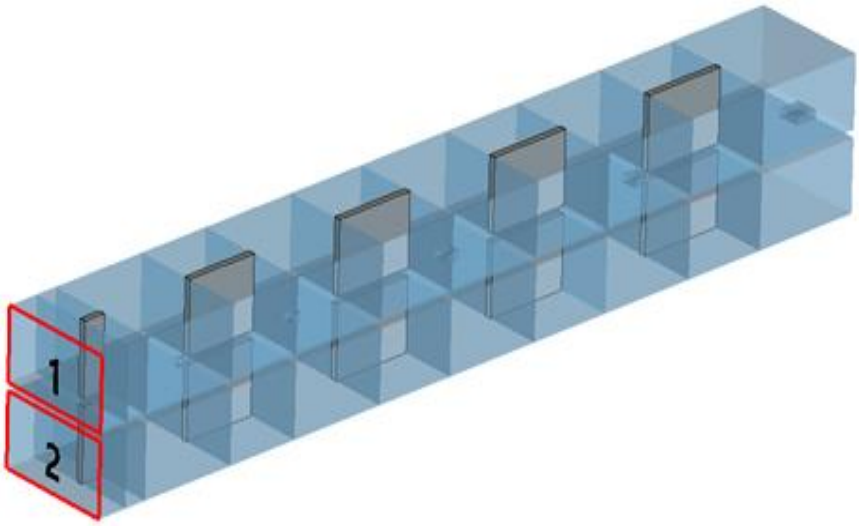


Рис. 1. *Трехмерная модель полосно-пропускающего фильтра 10-го порядка с металлическими вставками в Е-плоскости*

В разработанной конструкции металлические вставки размещаются посередине широкой стенки волновода и соединяют его верхнюю и нижнюю широкие стенки. Для оценки электромагнитного взаимодействия резонаторов проведено исследование влияния длины и толщины центральной вставки на коэффициент связи. Установлено, что увеличение длины и толщины вставки приводит к уменьшению коэффициента связи между резонаторами. Моделирование выполненялось в среде CST Studio Suite. Для подключения к внешним линиям использован волновод типоразмера WR-75. Внутренние габаритные размеры разработанного фильтра составляют 143,0 мм×19,05 мм×9,525 мм, толщина металлических вставок – 1 мм. Расчетная амплитудно-частотная характеристика и частотная зависимость группового времени запаздывания фильтра приведена на рис. 2.

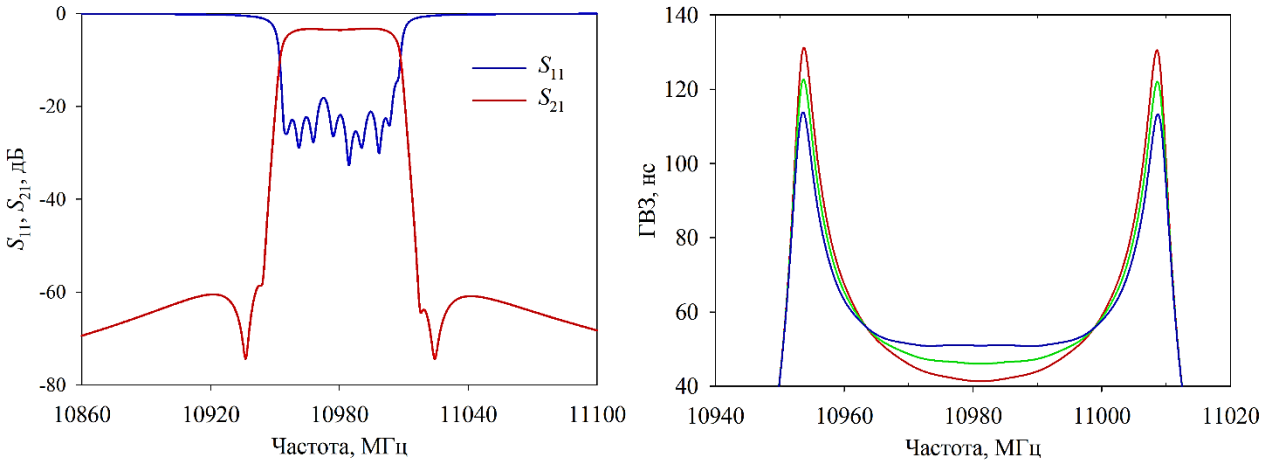


Рис. 2. *Расчётная амплитудно-частотная характеристика (слева) и частотная зависимость группового времени запаздывания фильтра (справа) (красная линия – схема 10-4-0, зеленая линия – схема 10-4-2, синяя линия – схема 10-4-4)*

Таким образом в результате электромагнитного моделирования получены следующие параметры фильтра: центральная частота полосы пропускания f_c=10981,25 МГц; ширина полосы по уровню обратных потерь -20 дБ - 54 МГц; относительная полоса около 0,5 %; минимальные потери 3,2 дБ; коэффициент стоячей волны по напряжению не более 1,3. Из рис. 2 видно, что увеличение количества полюсов на характеристике группового времени запаздывания приводит к уменьшению его неравномерности в полосе f_c±10 МГц с 3,6 до 0,4 нс (в 9 раз). Результаты показывают возможность применения предложенной конструкции в волноводных фильтрах для систем космической связи.

А. О. Афонин[1,2], И. В. Говорун[1,3], Ал. А. Лексиков[1], А. В. Угрюмов[1,2]
[1]Институт физики им. Л. В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН
Красноярск, Российская Федерация
[2]АО «НПП «Радиосвязь», Красноярск, Российская Федерация
[3]Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ МИНИАТЮРНЫЙ МОНОЛИТНЫЙ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР

Аннотация. Представлен монолитный миниатюрный полосно-пропускающий фильтр 4-го порядка. Разработанный фильтр изготовлен по технологии многослойных печатных плат. Центральная частота полосы пропускания устройства составила 85 МГц, а ее относительная ширина (по уровню −3 дБ) - 49%. Минимальные вносимые потери в полосе пропускания фильтра составили 1.4 дБ, а уровень отражений в полосе пропускания не превышает −20 дБ. Габариты фильтра составили 17,1 × 4,1 × 18,9 мм, а масса устройства не превышает 1,6 г. Разработанный фильтр имеет возможность его установки на СВЧ-плате методом поверхностного монтажа.
Ключевые слова*:* полосно-пропускающий фильтр, многопроводниковый резонатор, технология печатных плат.
Для цитирования*:* Афонин А. О., Говорун И. В., Лексиков Ал. А., Угрюмов А. В. Широкополосный миниатюрный монолитный полосно-пропускающий фильтр // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. O. Afonin[1,2], I. V. Govorun[1,3], Al. A. Leksikov[1], A. V. Ugryumov[1,2]
[1]Kirensky Institute of Physics, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation
[2]JSC “NPP “Radiosvyaz”, Krasnoyarsk, Russian Federation
[3]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

COMPACT MONOLITHIC WIDEBAND BANDPASS FILTER

Annotation. A fourth-order monolithic miniature bandpass filter is presented. The developed filter is fabricated using multilayer printed circuit board (PCB) technology. The center frequency of the passband is 85 MHz, and its fractional bandwidth (at the −3 dB level) is 49%. The minimum insertion loss in the passband is 1.4 dB, while the return loss within the passband does not exceed −20 dB. The filter dimensions are 17,1 × 4,1 × 18,9 mm, and the device weight does not exceed 1,6 g. The developed component is designed for surface-mount device (SMD) technology installation on an RF/microwave PCB.
Keywords*:* band-pass filter, multi-conductor resonator, printed circuit board (PCB) technology.
For citation*:* Afonin A. O., Govorun I. V., Gorn M. Yu., Leksikov Al. A., Ugryumov A. V. Compact monolithic wideband bandpass filter// Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Важнейшими устройствами любой радиотехнической системы являются полосно-пропускающие фильтры (ППФ). Разработка миниатюрных, технологичных радиотехнических устройств, имеющих низкую стоимость при массовом производстве, является важной и приоритетной задачей, стоящей перед научными и инженерными работниками. Всем этим критериям удовлетворяют фильтры, выполненные по технологии многослойных печатных плат (МПП).

У устройства, разработанного по технологии МПП, несущими слоями являются слои диэлектрика, которые соединены между собой специальном материалом – препрегом.

В данной работе описана конструкция монолитного миниатюрного полосно-пропускающего фильтра 4-го порядка, обладающего широкой полосой пропускания.

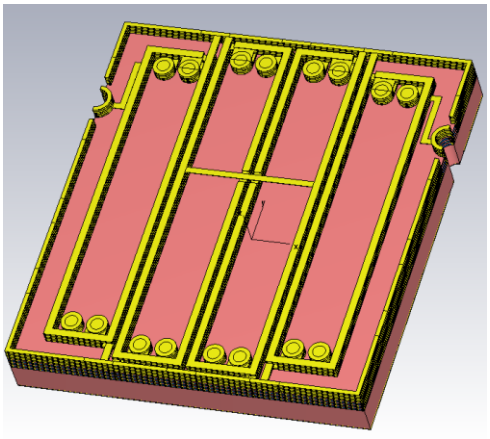


Рис. 1. *Трехмерная модель полосно-пропускающего фильтра 4-го порядка*

Фильтр представляет собой структуру, состоящую из семи несущих диэлектрических слоев, и содержит четыре многопроводниковых двуспиральных резонатора. Топология проводников расположена с обеих сторон диэлектриков на слоях со второго по шестой. Проводники каждого из резонаторов на соседних слоях соединены между собой через глухие металлизированные отверстия. Для увеличения электромагнитного взаимодействия между центральными резонаторами введен элемент гальванической связи. Вход и выход фильтра подключены кондуктивно к портам с волновым сопротивлением 50 Ом. Наружная металлизация торцов является экраном фильтра. В качестве материала несущих диэлектрических слоев был выбран Rogers RO4350 (εR = 3,66, tgδR = 0,0037). Для 1-ого и 7-ого слоев (внешние слои ППФ) толщина диэлектрика составила 1.44 мм. Внутренние слои, на которые был нанесен рисунок топологии, имели толщину 0,102 мм. В качестве материала препрега был выбран RO4450F (εR = 3,52 и tgδR = 0,0041) толщиной 0,102 мм.

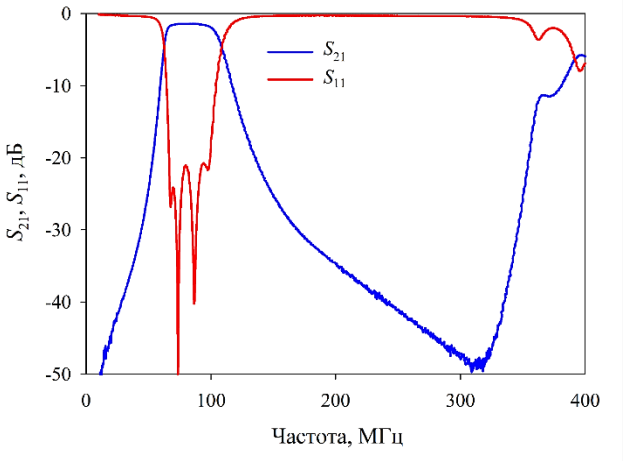


Рис. 2. *Амплитудно-частотная характеристика изготовленного фильтра (синяя линия – S_{21}, красная линия – S_{11})*

По результатам разработки была изготовлена партия фильтров на единой многослойной печатной плате. Амплитудно-частотная характеристика одного их изготовленных образцов фильтра приведена на рис. 2. Синей линией приведена частотная зависимость S_{21}, а красной – S_{11}. В результате измерения изготовленного макета фильтра получены следующие результаты: центральная частота полосы пропускания - 85 МГц, ее относительная ширина (по уровню −3 дБ) - 49%. Минимальные вносимые потери в полосе пропускания фильтра составили 1,4 дБ, а уровень отражений в полосе пропускания не превышает −20 дБ. Габариты отдельного фильтра составили 17,1 × 4,1 × 18,9 мм, а масса устройства всего 1,6 г.

М. И. Бойчук, С. А. Демин, Л. А. Васильева
Акционерное общество «ЛИТ-ФОНОН», Москва, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТНИ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ В МИНИАТЮРНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСАХ

***Аннотация*.** Создание приборов радиоэлектроники и техники связи в целом связано с увеличением её надежности, стабильности генерируемых частот, выбору качественных комплектующих, избирательности приемной аппаратуры. Одним из главных составных элементов, который повсеместно используется в микросхемах, является кварцевый резонатор. Применения кварцевых резонаторов в электрогенераторах позволяет гарантировать высокую стабильность частоты и повышенную надежность без усложнения схемы. Мировая тенденция при разработке современной электротехнической аппаратуры связана с миниатюризацией, кварцевые резонаторы по своим габаритам с каждым годом уменьшаются. При этом требования по надежностным характеристикам остаются высокими. Цель этой работы заключается в том, чтобы оценить возможность применения кварцевых резонаторов, представленных в миниатюрном керамическом корпусе размером 2,5×2,0×0,6 мм, в условиях с повышенными требованиями к температуре окружающей среды, а также подобрать наиболее оптимальные требования к режиму термотренировке, который является базовой технологической операцией для стабилизации частоты колебаний.
***Ключевые слова*:** кварцевый резонатор, надежность, керамический корпус, частота колебаний, температура.
***Для цитирования**:* Бойчук М. И., Демин С. А., Васильева Л. А. Исследование и анализ надежностни кварцевых резонаторов в миниатюрных керамических корпусах // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

M. I. Boychuk, S. A. Demin, L. A. Vasilyeva
«LIT-FONON» Joint Stock Company, Moscow, Russian Federation

INVESTIGATION AND ANALYSIS OF THE REALIABILITY OF QUARTZ RESONATORS IN MINIATURE CERAMIC PACKAGES

***Abstract*.** The development of electronic and communications devices generally involves increasing reliability, generating frequency stability, selecting high-quality components, and selecting the selectivity of receiving equipment. One of the key components commonly used in integrated circuits is the quartz crystal resonator. The use of quartz crystals in electric generators ensures high frequency stability and increased reliability without complicating the circuit. The global trend in the development of modern electrical equipment is toward miniaturization, with quartz crystals becoming smaller every year. However, reliability requirements remain high. The objective of this study is to evaluate the feasibility of using quartz crystals housed in a miniature 2.5 × 2.0 × 0.6 mm ceramic package in environments with increased ambient temperature requirements, as well as to determine the optimal thermal conditioning requirements, which is a basic technological step for stabilizing oscillation frequency.
Keywords: quartz resonator, reliability, ceramic case, vibration frequency, temperature.
***For citation**:* Boychuk M. I., Demin S. A., Vasilyeva L. A. Investigation and analysis of the realiability of quartz resonators in miniature ceramic packages // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Формирование разных приборов радиоэлектроники и техники связи в целом связано с увеличением её надежности, стабильности генерируемых частот, избирательности приемной аппаратуры. Проблема повышения надежности средств связи была решена с помощью кварцевых резонаторов, которые повсеместно в радиосхемах. Использование кварцевых резонаторов в электрогенераторах позволяет гарантировать нам высокую стабильность частоты без усложнения схемы. Электрофильтры с кварцевыми резонаторами обладают более высокими параметрами, чем фильтры с катушкой индуктивности и конденсаторами.

В настоящее время производство кварцевого резонатора считается экономически прибыльным, несмотря на то, что появились материалы, в которых стабильность отдельных параметров лучше, чем у кварца.

Для того чтобы повысить конкурентоспособность производства, нужно провести изменения в технологию изготовления, направленые на снижение цены изделий. Например, можно изменить режим термотренировки, чтобы сократить время производства и не потерять качество изделия. Но не все технологические процессы можно изменять.

В научно-производственном комплексе «Кварцевые генераторы и резонаторы» акционерного общества «ЛИТ-ФОНОН» есть оборудование, которое позволяет провести эксперимент при высоких температурах +85 °С и +125 ºС. Для проведения эксперимента выборкой были взяты сорок два резонатора типа РК588 в керамическом корпусе с габаритными размерами 2,5×2,0×0,6 мм и номинальной частотой 40 МГц.

Из 42 резонаторов были сформированы 3 партии по 14 в каждой (далее партия №1, партия №2, партия №3). Партия №1 состояла из 14 резонаторов, которые подверглись термотренировке при температуре +85 °С в течение 1000 часов. Партия №2 состояла из 14 резонаторов, исследование которых велось при температуре +125 °С в течение шести недель (1000 часов). Партия №3 тоже исследовалась при +125 °С, но на протяжении 100 часов. Замер частоты резонаторов партий №1 и №2 проводился в таком порядке: 125 часов, 250 часов, 500 часов и 1000 часов; замер партии № 3 проводился ежедневно, через каждые 24 часа. Перед началом эксперимента частоты всех резонаторов были замерены при помощи технологического оборудования «Динар». После замера партии №1, резонаторы были установлены в термокамеру, при температуре +85 °С, партии №2 и №3 были установлены в температурном режиме +125 °С соответственно. Через каждый установленный промежуток времени термокамера входила в режим медленного остывания, что, в свою очередь, позволило избежать большого значения температуры в кристаллическом пьезоэлементе кварцевого резонатора, которое могло привести к высокой нагрузке кристалла, электрода и повлиять на частоту резонатора.

Через 12 часов после того, как термокамера заканчивает процесс медленного остывания, резонаторы из активного режима достигали термодинамического равновесия с окружающей средой при комнатной температуре. В таких условиях были проведены измерения частоты, описываемые ниже.

Все испытания и замеры частот этого эксперимента производятся на технологическом оборудовании частотоизмеряющей установки «Динар». Установка позволяет провести замеры частот резонатора в интервале от 1 Гц до 100 МГц. Тем не менее, точность замера уменьшается с увеличением частоты резонатора. Для того чтобы избежать ошибки в расчетах отклонения частоты от нормы необходимо определить погрешность замеров для каждого типа резонаторов.

Для резонаторов в герметизированном корпусе применима размерность относительной частоты, которая выражается в относительных единицах. Чтобы уменьшить вероятность случайной ошибки замеры резонаторов проводились в одних и тех же колодках (гнездах) установки «Динар».

Было выбрано 14 резонаторов частотой 40 МГц, которые прошли термотренировку в течение 1000 часов при температуре +85 ºС. Если допустить, что процессы старения в

этих резонаторах прекратились, то распределение частот резонаторов за малый интервал времени можно использовать в качестве определения погрешности частотоизмеряющей установки «Динар».

Замеры проводились с температурой +25 ºС, при низкой влажности воздуха и нормальном давлении. Первые замеры проводились для того, чтобы определить частоту каждого резонатора данной партии. После того, как были проведены замеры, резонаторы извлекались из установки «Динар» и в течение 4 часов они оставались при неизменных условиях. Далее с теми же условиями проводились повторные замеры частот. С повторными замерами, уход частоты меняется, но их интервал не становится больше. Размер уходов частоты резонаторов находится в промежутке от $-0{,}5\times10^{-6}$ до $+0{,}4\times10^{-6}$. Из проведенного опыта можно сделать вывод, что погрешность измерения частоты установки «Динар» не превышает $\pm0{,}5\times10^{-6}$. Полученный результат означает, что абсолютная ошибка замеров частоты резонаторов с номинальной частотой 40 МГц на установке «Динар» не превышает 11 Гц.

Как говорилось выше, прежде чем провести термотренировку, проводились измерения частоты всех резонаторов, с целью установить их рабочую частоту. Рассматриваемые в работе резонаторы изготавливались на частоту 40 МГц. Исходя из данных по контролю на соответствие требованиям надежности для резонаторов типа РК588, в процессе и после испытаний относительный уход частоты не должен превышать $\pm15\times10^{-6}$. Замер частоты для партии №1 проводился в таком порядке: 125 ч., 250 ч., 500 ч., 1000 ч. При нормальных условиях резонаторы выдерживались до состояния термодинамического равновесия с окружающей средой. Все резонаторы из партии №1 прошли тест на отбраковку, уходы частот по модулю не превысили $\pm15\times10^{-6}$, что говорит о высоком качестве изделий.

Был посчитан коэффициент старения, для этого было найдено среднее значение суммы относительных уходов частоты резонаторов в точках экстремума 500 часов и 1000 часов. Далее результат, полученный в точке 1000 часов, был поделен на результат, полученный в точке 500 часов: $k_1=0{,}75$.

После замера частот на 500 часов, у резонаторов постепенно уменьшается уход частоты, но отчетливо видно, что при испытании партии №2 с температурой +125 °С уходы частоты двух резонаторов №1 и №13 выходят за пределы нормы, установленной на данном испытании $\pm15\times10^{-6}$, а значит что эти изделия не пройдут испытание на безотказность при такой высокой температуре. Для второй партии изделий был так же рассчитан коэффициент старения: $k_2=0{,}18$.

Для того, чтобы оценить возможность сокращения времени проведения термотренировки путем увеличения температуры, было определено время воздействия термотренировки с температурой +125 °С (100 часов), эффект планировался такой же, как и от термотренировки при +85 °С в течении 6 недель.

Относительный уход частоты практически всех резонаторов из партии №3 за первые сутки значительно выше, чем за остальной период, и превышает у большинства изделий норму: $\pm15\times10^{-6}$.

Таким образом, для стабилизации изделий требуется минимум 24 часа, это значит, для того чтобы использовать изделия при температуре +125 ºС и в течение 125 часов, нужно принять во внимание, что в первый день уход частоты у большинства резонаторов превышает норму, отсюда вывод, при напылении электрода кристаллического элемента следует учесть, что частота изготавливаемых резонаторов должна быть ниже примерно на 10×10^{-6} в относительных значениях.

Обратим внимание на тот факт, что изделия партии №1 и партии №2 стабилизируются в течение 500 часов, и выходят на свое верхнее значение частоты, после чего частота начинает плавно снижаться, поэтому в качестве базовой для расчета коэффициента старения выбрана именно точка экстремума.

Таким образом, расчетный коэффициент старения по результатам испытаний кварцевых резонаторов на безотказность для партии № 1 при температуре +85 ºС составил: k_1=0,75, а для партии №2 при температуре +125 ºС, k_2=0,18. Разница коэффициентов в ходе процессов старения составила: d = 4,1.

Для данного типа пьезоэлемента размером 1,5×1,0 мм, при рабочей температуре +125 ºС коэффициент старения ниже в 4 раза, чем при температуре +85 ºС, что говорит о возможности применения резонатора РК588 в условиях повышенной температуры окружающей среды.

С. П. Букин, С. В. Крутиев, М. А. Михайлов, В. Н. Корж, Э. Р. Шаповалов
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

КВАЗИЭЛЛИПТИЧЕСКИЙ SIW ФИЛЬТР НА ОСНОВЕ ГРЕБНЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Аннотация. Рассмотрена возможность реализации квазиэллиптического фильтра на основе гребневых резонаторов, выполненного по технологии substrate integrated waveguide (SIW). В отличие от классической металлической волноводной конструкции, в которой прямоугольный гребень размещается внутри воздушного волновода, в SIW используется многослойная структура с интегрированным гребнем. Для моделирования выбрана подложка Rogers RT/duroid 5880 с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 2{,}2$ и тангенсом угла потерь $\tan\delta = 0{,}0009$. Исследовано влияние положения и ориентации гребневого элемента на коэффициенты связи и формирование нулей передачи.
Ключевые слова*:* SIW-технология, квазиэллиптический фильтр, гребневой резонатор, нули передачи, электродинамическое моделирование, связь резонаторов.
Для цитирования*:* Букин С. П., Крутиев С. В., Михайлов М. А., Корж В. Н., Шаповалов Э. Р. Квазиэллиптический SIW фильтр на основе гребневых резонаторов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

S. P. Bukin, S. V. Krutiev, M. A. Mikhailov, V. N. Korzh, E. R. Shapovalov
Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

QUASI-ELLIPTIC SIW FILTER USING RIDGED RESONATORS

Abstract. The feasibility of implementing a quasi-elliptic filter based on ridge resonators fabricated using substrate integrated waveguide (SIW) technology is considered. In contrast to the conventional metallic waveguide design, in which a rectangular ridge is placed inside an air-filled waveguide, the SIW implementation employs a multilayer structure with an integrated ridge. Rogers RT/duroid 5880 substrate with a relative permittivity of $\varepsilon_r = 2{,}2$ and a loss tangent of $\tan\delta = 0{,}0009$ was chosen for the simulation. The influence of the position and orientation of the ridge element on the coupling coefficients and on the formation of transmission zeros is investigated.
Keywords*:* SIW technology, quasi-elliptic filter, ridge resonator, transmission zeros, electromagnetic simulation, resonator coupling.
For citation*:* Bukin S. P., Krutiev S. V., Mikhailov M. A., Korzh V. N., Shapovalov E. R. Waveguide bandpass filter based on three thin resonant diaphragms // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Нули передачи на конечных частотах позволяют получить крутые скаты, не увеличивая порядок фильтра, однако классические способы их формирования — перекрёстные связи между несоседними резонаторами, многомодовые и свёрнутые конструкции — нарушают инлайн-геометрию с постоянным поперечным сечением. Известно, что нуль передачи создаёт одиночный прямоугольный гребень, размещённый в волноводе со смещением и (или) наклоном относительно его оси, а сама конструкция остаётся отрезком прямого волновода. Ниже эта топология рассматривается как исходная для реализации в SIW.

Гребень длиной $l \approx \lambda/2$ образует резонатор, поле которого сосредоточено в зазоре g между гребнем и противоположной стенкой и слабо зависит от ориентации. Такая

структура описывается матрицей связей 3×3 с ненулевой связью «источник–нагрузка», то есть является синглетом и даёт одновременно ноль отражения и ноль передачи. Соединение синглетов четвертьволновыми отрезками в волноводе нарушается сильной связью по высшим модам, поэтому гребни каскадируются через полуволновые секции (рис. 1): N резонирующих гребней и N – 1 секций дают фильтр порядка 2N – 1 с N произвольно расположенными нулями.

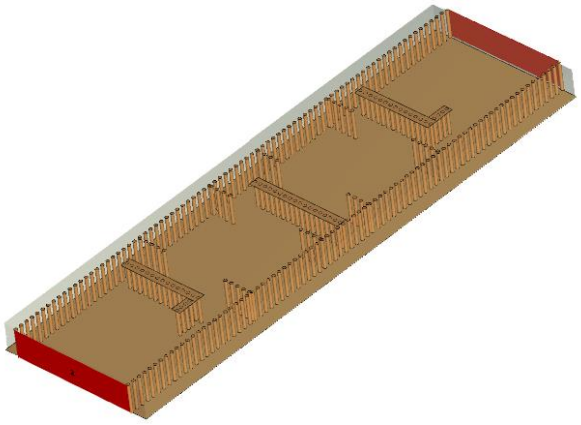


Рис. 1. *Модель многослойного SIW фильтра*

При подходе, основанном на использовании технологии SIW образования нуля сохраняется, но изменяются условия его реализации. Во-первых, заполнение волновода диэлектриком уменьшает поперечные размеры примерно 1.5 раза. Во-вторых, высота волновода равна толщине подложки, поэтому отношение g/b, определяющим образом влияющее на коэффициент связи и на добротность, задаётся только многослойной структурой: гребень выполняется внутренним проводящим слоем, а зазор — толщиной слоя над ним. В-третьих, боковые стенки формируются рядами металлизированных отверстий диаметром d с шагом p при $d \le \lambda g/5$ и $p \le 2d$, что ограничивает минимально реализуемое смещение гребня. Результаты электромагнитного моделирования рассматриваемого SIW фильтра приведены на рис. 2.

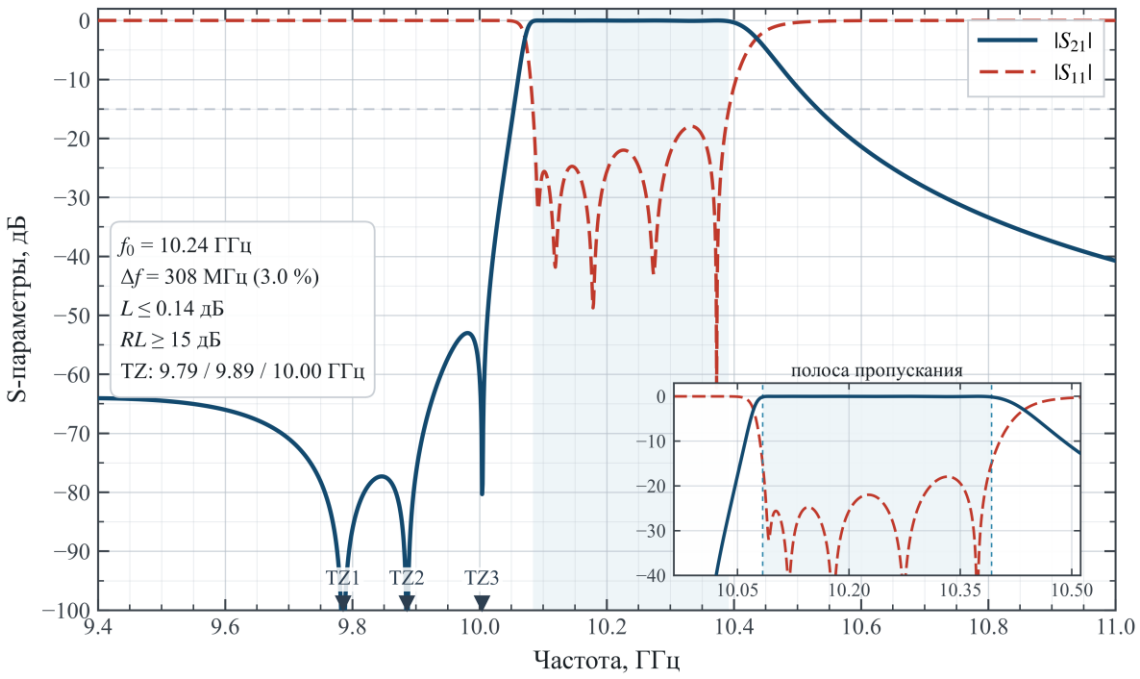


Рис. 2. *Амплитудно-частотная характеристика SIW фильтра.*

Переход от металлической волноводной технологии к SIW позволяет существенно уменьшить массу и габариты устройства, а также обеспечить совместимость фильтра с печатными микроволновыми схемами. Основной особенностью является необходимость дополнительной оптимизации размеров, поскольку эффективная длина резонатора и коэффициенты связи изменяются вследствие заполнения волновода диэлектриком.

Таким образом, концепция гребневого псевдоэллиптического фильтра может быть реализована в технологии SIW путем использования двухслойной конструкции с интегрированным гребнем. Сохраняются инлайн-геометрия и возможность размещать нули передачи по обе стороны от полосы пропускания.

И. В. Веремеев, А. С. Веремеева
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

МИНИАТЮРИЗАЦИЯ STW-РЕЗОНАТОРОВ НА ЧАСТОТЫ 200–1000 МГЦ

Аннотация. В работе исследуются возможности уменьшения габаритов высокодобротных STW-резонаторов путем конструктивно-топологической оптимизации. За счет применения в топологии резонаторов в диапазоне частот 200-1000 МГц асинхронной отражательной решетки с уменьшенными количеством электродов, габаритные размеры применяемых корпусов удалось уменьшить (до 3,3 раз по монтажному объему), а добротность уменьшилась на 3-10% при значениях Q≥5000.
Ключевые слова*:* поперечные волны, ПАВ, резонатор, миниатюризация
Для цитирования*:* Веремеев И. В., Веремеева А. С. Миниатюризация STW-резонаторов на частоты 200–1000 МГц // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества: тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

I. V. Veremeev, A. S. Veremeeva
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

200–1000 MHZ STW-RESONATOR MINIATURIZATION

Annotation. The paper explores the possibilities of reducing the size of high-Q STW resonators through structural and topological optimization. By using an asynchronous reflectives with a reduced number of electrodes in the topology of the resonators within the frequency range of 200–1000 MHz, the overall dimensions of the used housings were reduced (by up to 3.3 times in terms of mounting volume), while the quality factor decreased by 3–10% at Q≥5000.
Keywords*:* STW, SAW, resonator, miniaturization.
For citation*:* Veremeev I. V., Veremeeva A. S. 200–1000 MHz STW-resonator miniaturization// Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter: Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2026.

Миниатюрные малошумящие генераторы с резонатором на поверхностных акустических волнах (ПАВ) широко используются в качестве источника высокостабильных колебаний в различных электронных системах, особенно в устройствах связи и навигации. Преимуществом использования в резонаторах высокоскоростной (V=5000 м/с) поперечной ПАВ (STW) является возможность изготовления высокочастотных STW-резонаторов (до 1,6 ГГц) с бóльшим периодом встречно-штыревого преобразователя (ВШП) и размерами элементов (до 0,8 мкм) топологии, что является более технологичным решением. При этом, увеличение периода ВШП неизбежно приводит к увеличению размеров резонансной полости и топологии STW-резонаторов в целом. Использование асинхронной отражательной решетки (ОР) STW-резонаторов позволяет добиться одновременно высокой добротности от 8000 и определённого снижения габаритов за счет уменьшения количества Al электродов в ОР до 200–

300 шт. Дальнейшее уменьшение количества электродов в ОР приводит к уменьшению добротности и степень влияния данного эффекта исследовалась в данной работе.

Для снижения габаритов при сохранении значений Q≥5000 проведена оптимизация топологических параметров STW-резонаторов с использованием модели эквивалентных схем и матриц смешанных параметров. Расчет проводился для асинхронных STW-резонаторов на частоты 241,9 МГц и 766 МГц с соотношением периода электродов ВШП и ОР (отражательной решетки) равным 0,997. Рассчитаны частотные характеристики для резонаторов с количеством электродов в ОР: 241,9 МГц –230/120/50 шт; 766 МГц –350/140/50 шт. Резонаторы с уменьшенной ОР до 120-140 электродов показали незначительное ухудшение добротности (-3%) и увеличение сопротивления на резонансной частоте (+5%), а у резонаторов с ОР по 50 электродов – добротность изменилась на (-8%), а сопротивление на (+10%).

Для проведения экспериментальных исследований изготовлены по одной подложке YX/36°+90° кварца с изготовленным групповым методом массивом STW-резонаторов на частоты 241,9 МГц, 766 МГц. Характеристики каждого STW-резонаторов измерены на неразрезанной подложке анализатором цепей с помощью зондовой станции для СВЧ-измерений. Модулям на подложке присваивался индивидуальный индекс и отмечался на обратной нерабочей стороне подложки. После измерений групповые подложки разрезались на отдельные кристаллы, при этом у первой половины модулей на подложке ОР отрезалась до значения 120 электродов, а второй половины до 50 электродов. Кристаллы STW-резонаторов с обрезанной ОР повторно измерялись на зондовой станции. Сравнения характеристик до и после обрезания ОР подтвердили результаты, полученные при моделировании STW-резонаторов.

Добротность измеренных резонаторов с укороченной ОР до 50 электродов у всех измеренных модулей была не менее 5000, что соответствуют требованиям для применения в малошумящих СВЧ ПАВ-генераторах. Разработанная топология STW-резонатора на 766 МГц с укороченной асинхронной ОР наглядно демонстрирует уменьшение габаритов кристалла с 3,2x1,6 мм до 1,2x1,4 мм (см. рис.). Уменьшение площади кристалла почти в 3 раза обеспечивает монтаж в SMD-корпуса уменьшенных габаритов (для 766 МГц с 5,0x5,0x1,8 мм до 3,0x3,0x1,5 мм). Аналогичная ситуация и для других STW-резонаторов в диапазоне частот 200–1000 МГц.

а *б*

Топологии ПАВ-резонаторов на 766 МГц с габаритами 3,2x1,6 мм при ОР 350 электродов (а) и с оптимизированными габаритами 1,2x1,4 мм при ОР 50 электродов (б)

Уменьшение размера топологии STW-резонатора за счет оптимизации ОР обеспечивает монтаж в SMD-корпуса меньших габаритов. В 2,8-3,3 раз уменьшен объем, требуемый для монтажа STW-резонатора в изделие. При этом уменьшение электродов в ОР приводит к увеличению сопротивления на резонансной частоте и уменьшению добротности на 3-10% при значениях Q≥5000. Проведённые исследования в составе ПАВ-генераторов показали, что использование оптимизированных ПАВ-резонаторов не ухудшает возможность настройки и электрические параметры ПАВ-генераторов.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер государственной регистрации проекта 124022500291-6).

К. А. Галкина[1,2], А. О. Ложников[1]
[1]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[2]Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫЕ КВАРЦЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Аннотация. Представлен вариант минимизации эффекта подстройки в кварцевых генераторах с термокомпенсацией на основе 3 терморезисторов. Это позволило добиться высокой стабильности частоты на широком диапазоне рабочих температур и сохранить долговременную стабильность частоты.
Ключевые слова*:* ТККГ, стабильность частоты, кварцевый генератор, варикап.
Для цитирования*:* Галкина К. А., Ложников А. О. Термокомпенсированные кварцевые генераторы с улучшенными характеристиками // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

K. A. Galkina[1,2], A. O. Lozhnikov[1]
[1]Scientific Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

TCXO WITH IMPROVED CHARACTERISTICS

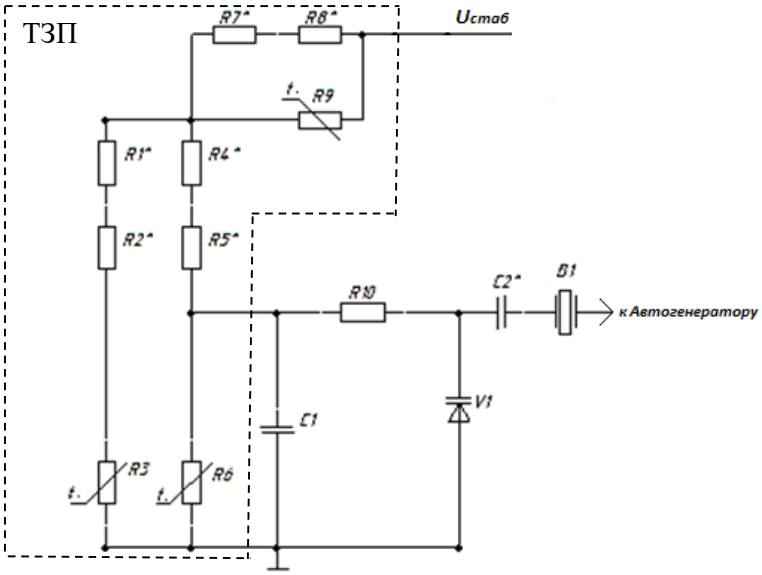
Annotation. This paper presents a method for minimizing the trimm effect in temperature-compensated quartz crystal oscillators using three thermistors. This approach achieved high frequency stability over a wide operating temperature range while maintaining long-term frequency stability.
Keywords*: TCXO,* temperature compensation, , quartz oscillator, varactor.
For citation*:* Galkina K. A., Lozhnikov A. O. TCXO with Improved Characteristics // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Термокомпенсированные генераторы – это кварцевые генераторы, температурный уход частоты которых скомпенсирован с помощью схемы термозависимого потенциометра (ТЗП), управляющего варикапом, включенным с схему автогенератора вместе с кварцевым резонатором. Благодаря сочетанию высокой стабильности, компактности и низкого энергопотребления, термокомпенсированные кварцевые генераторы находят широкое применение в аппаратуре связи, навигационных системах. Дальнейшее повышение температурной стабильности термокомпенсированных генераторов ограничено в первую очередь немонотонностью и гистерезисом температурно-частотной характеристики (ТЧХ) резонатора. Также существенный вклад в результирующую нестабильность частоты вносит крутизна ТЧХ. При работе с участками ТЧХ, имеющими большую крутизну и требующими значительного изменения управляющего напряжения температурно-зависимого потенциометра, требуется большее изменение емкости варикапа, и, соответственно, увеличивается ошибка термокомпенсации. Так же для компенсации старения резонатора вводят дополнительный варикап коррекции частоты, изменение напряжения на котором вызывает так называемый эффект подстройки. Это все приводит к увеличению нестабильности частоты генератора.

Основной задачей было минимизировать влияние эффекта подстройки частоты на температурную стабильность термокомпенсированных кварцевых генераторов, то есть обеспечить её минимальную деградацию при коррекции частоты генератора.

Данная задача была решена применением варикапа, отвечающего за термокомпенсацию, имеющиго наибольшее возможное значение емкости и схемы автогенератора с минимальной эквивалентной емкостью. Это обеспечивает максимальное отношения емкостей C_B/C_A (C_B – емкость варикапа, C_A – емкость, включающая в себя эквивалентную емкость схемы автогенератора, емкость подстроечного конденсатора и емкость варикапа коррекции частоты). Также повышение требований к линейности ТЧХ кварцевых резонаторов и уменьшению допустимых температурных уходов частоты также уменьшит изменения емкости варикапа.

Макетирование термокомпенсированных кварцевых генераторов проводилось на резонаторах в металло-керамических корпусах с номинальной частотой 10 МГц. Термокомпенсация реализована на схеме термозависимого потенциометра представленного на рисунке.



Электрическая схема термозависимого потенциометра генератора

Необходимые параметры для расчета ТЗП схемы и генератора в целом: резонатор (частота, статическая и динамическая емкость, перестройка), емкость варикапа от изменения напряжения, сопротивления терморезисторов, эквивалентная емкость схемы автогенератора. С помощью математических вычислений был выполнен расчет необходимых элементов и собраны генераторы. Регулировка генераторов осуществлялась в диапазоне температур от минус 60 до +70 °С, температурная стабильность составила$\pm 2{,}5\ 10^{-6}$.

Макетирование на резонаторах 10 МГц в диапазоне температур от –60 до +70 °С подтвердило эффективность предложенного максимального отношения емкостей C_B/C_A, достигнута температурная стабильность частоты $\pm 2{,}5\times10^{-6}$. При этом в процессе непрерывной работы и подстройки частоты на старение в пределах $\pm 6\times10^{-6}$ заявленная температурная стабильность полностью сохраняется.

Таким образом, схемотехническое решение обеспечивает высокую температурную стабильность частоты в широком диапазоне температур без значительного её ухудшения при коррекции, что подтверждает его перспективность для использования в аппаратуре связи, навигационных системах.

П. В. Гейдт, В. Р. Шаяпов, А. Л. Богословцева, С. Ю. Чепкасов
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

АКУСТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ ГГц-ДИАПАЗОНА С БРЭГГОВСКИМ ОТРАЖАТЕЛЕМ, ВЫРАЩЕННЫЕ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Аннотация. Целью работы было выращивание и изучение функциональных рабочих характеристик многослойных структур, состоящих из: кремниевой подложки, брэгговского отражателя (пары Mo + Al), слоя AlN, металлических электродов. Рост образцов выполнен в НГУ, затем формирование верхнего электрода и измерение функциональных параметров резонаторов произведено в АО «ОНИИП». В докладе планируется изложить этапы создания такого прототипа резонатора и изучения его характеристик, с указанием на возможные причины расхождения между запланированными значениями частоты и обнаруженными в эксперименте, а также пути преодоления этого несоответствия.
Ключевые слова*:* многослойная структура, ГГц резонатор, брэгговский отражатель, S-параметры, импульсное магнетронное напыление.
Для цитирования*:* Гейдт П. В., Шаяпов В. Р., Богословцева А. Л., Чепкасов С.Ю. Акустические резонаторы ГГц-диапазона с брэгговским отражателем, выращенные методом импульсного магнетронного напыления// Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

P. V. Geydt, V. R. Shayapov, A. L. Bogoslovtseva, S. Yu. Chepkasov
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

ACOUSTIC RESONATORS IN GHZ RANGE WITH A BRAGG REFLECTOR GROWN BY PULSED MAGNETRON SPUTTERING

Annotation. The aim of the work was to grow and characterize the functional performance of multilayer structures consisting of: a silicon substrate, a Bragg reflector (Mo/Al pair), an AlN layer, and metal electrodes. The samples were grown in Novosibirsk State University, while the formation of the top electrode and the measurement of the resonators' functional parameters were carried out at JSC "ONIIP". The report will outline the stages of resonator fabrication and characterization, and discuss potential reasons for the significant discrepancies between the design/desire frequencies and those observed experimentally.
Keywords*:* multilayer structure, GHz resonator, Bragg reflector, S-parameters, pulsed magnetron sputtering.
For citation*:* Geydt P. V., Shayapov V. R., Bogoslovtseva A. L., Chepkasov S. Yu. Acoustic resonators in GHz range with a bragg reflector grown by pulsed magnetron sputtering // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Как известно, дефекты в пьезоактивном слое акустических резонаторов на объёмных акустических волнах (ОАВ) приводят к снижению характеристик устройств и ухудшению технологических характеристик материалов в них. Создание высокодобротных СВЧ-резонаторов гигагерцового диапазона является сегодня актуальной задачей, сочетающей трудности воспроизводимой масштабируемой технологии и актуальные научные проблемы материаловедческого характера.

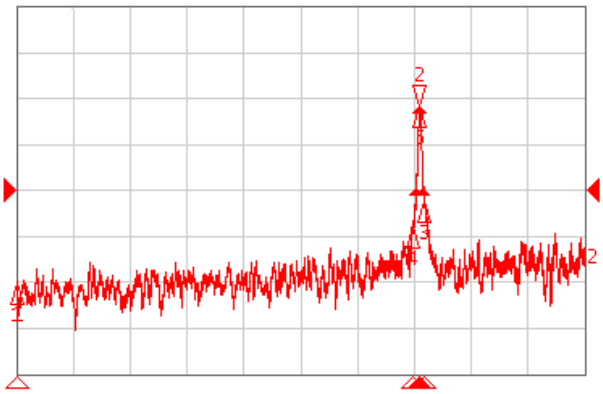
Развивая прошлогоднее исследование о связи условий магнетронного роста AlN с дефектностью, механическими напряжениями и набором диагностических методов, в

нынешнем 2026 г. нам удалось сформировать и исследовать акустические резонаторы на брэгговском отражателе с пьезоактивным слоем AlN.

Для проведения роста плёнок AlN использовалась вакуумная ростовая камера «СПУТНИК» ЛабФДНС ФФ НГУ и метод импульсного магнетронного напыления, отработанный ранее. Плёночные образцы были охарактеризованы методами РФА, РЭМ, АСМ, ИК-спектроскопии. В докладе будут показаны результаты применения диагностических методов.

После того, как рост образцов был выполнен в НГУ, затем формирование верхнего электрода и измерение функциональных параметров резонаторов произведено в АО «ОНИИП». Измерены S-параметры, определены частота и добротность. В докладе планируется изложить этапы создания резонатора и изучения его характеристик, с указанием на возможные причины расхождения между запланированными значениями частоты и обнаруженными в эксперименте. Измеренная частота f~2,38 ГГц оказалась заметно ниже расчётной в 4,46 ГГц, зато добротность Q составила порядка 400–480 на воспроизводимом уровне. При этом был замечен резонанс на частоте около 4,45 ГГц, соответствующий расчётной частоте для толщины плёнки AlN 1266 нм. Создание прототипа резонатора является положительным результатом в направлении от фундаментальной материаловедческой работы к прикладным разработкам в области систем передачи данных.

Таким образом, нынешние резонаторы следует рассматривать как первый для НГУ практический шаг в этой области, объединяющий ранее развитую диагностику AlN, оптимизацию брэгговского отражателя и плазменный контроль роста, а расхождение по частоте указывает на необходимость дальнейшей настройки технологии осаждения и расчёта при дизайне последующих многослойных структур.



Пример экспериментально измеренного спектра
для одного из сформированных резонаторов с характеристиками: f = 2,383 ГГц и Q = 483

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта государственного задания FSUS-2024-0020 с использованием измерительных приборов АТИЦКП НГУ.

Авторы благодарят АО «ОНИИП», В. И.Струнина, Н. А.Чирикова, А. Ю.Куклева и Н. М.Жилина за формирование электродов, изучение S-параметров и помощь в анализе результатов.

К. А. Григорьев[1,2], Ю. И. Егошин[1,2], Т. С. Тимошенко[1], А. Н. Яковлев[1]
[1]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[2]Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ТИПОРАЗМЕРА 1206

Аннотация. Показана возможность разработки и изготовления миниатюрных керамических фильтров типоразмером 1206 на основе отечественной керамики СКМ. Приведены основные пути снижения по частоте и улучшения электрических параметров для рассматриваемых фильтров. Показаны результаты электромагнитного моделирования фильтров нижних частот и полосовых.
Ключевые слова: СВЧ-фильтр, миниатюрный керамический фильтр, LTCC, LC-фильтр.
Для цитирования: Григорьев К. А., Егошин Ю. И., Тимошенко Т. С., Яковлев А. Н. Опыт разработки интегральных фильтров типоразмера 1206 // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

K. A. Grigorev[1,2], Y.I. Egoshin[1,2], T.S. Timoshenko[1], A.N. Yakovlev[1]
[1]Scientific Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

EXPERIENCE IN THE DESIGN OF INTEGRATED FILTERS IN THE 1206 PACKAGE

Annotation. The paper demonstrates the feasibility of developing and manufacturing miniature ceramic filters in the 1206 package size based on domestic SKM ceramic material. The main approaches to reducing frequency characteristics and improving electrical parameters for the considered filters are given. The results of electromagnetic simulation of lowpass and bandpass filters are shown.
Keywords: microwave filter, miniature ceramic filter, LTCC, LC-filter.
For citation: Grigorev K. A., Egoshin Y. I., Timoshenko T. S., Yakovlev A. N. experience in the design of integrated filters in the 1206 package // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Опыт разработки интегральных фильтров из низкотемпературной керамики широко известен в нашей стране. На сегодняшний день существует достаточно широкая номенклатура типоразмеров таких фильтров отечественного производства, однако их габаритные размеры сильно отличаются от иностранных аналогов, что приводит к увеличению трудоемкости, а соответственно и стоимости готового изделия при их замене, а при разработке новых изделий – к увеличению массогабаритных характеристик. Поэтому разработка и изготовление интегральных керамических LC-фильтров в стандартных типоразмерах (1206,0805 и т.д.) является актуальной задачей. Вопросы подхода к проектированию и основные проблемы при изготовлении миниатюрных интегральных фильтров уже были рассмотрены ранее. Однако дальнейшее снижение по частоте или улучшение электрических характеристик за счет увеличения порядка фильтров возможно путем применения следующих подходов:

- использование материалов с более высокой диэлектрической проницаемостью для уменьшения площади элементов;

- уменьшение толщины керамических листов и, как следствие, увеличение емкости конденсаторов при той же занимаемой площади;

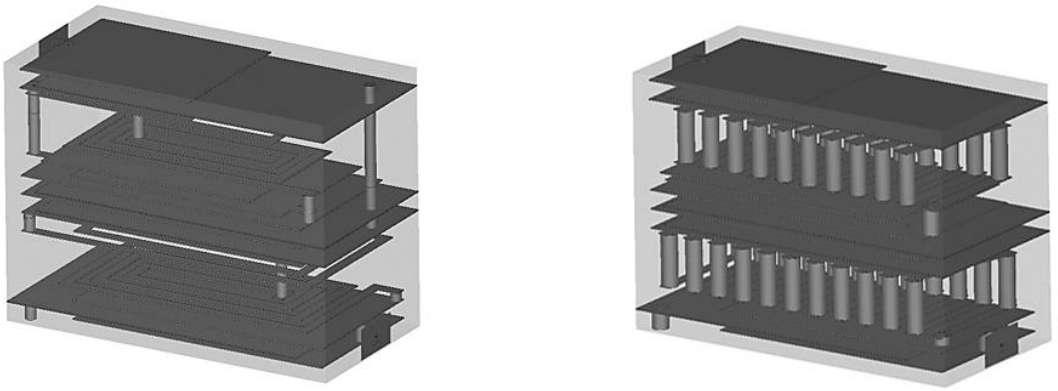
- применение новых конструкций катушек индуктивностей с более высокой добротностью и номинальной индуктивностью;

- применение вертикальной компоновки.

Наиболее эффективным при этом будет одновременное сочетание нескольких подходов.

В данной работе рассмотрен опыт разработки интегральных LC-фильтров нижних частот и полосовых типоразмера 1206 (3,2х1,6 мм) в диапазоне частот от 350 МГц на основе отечественной керамики СКМ.

Интегральные LC-фильтры являются монолитной структурой, в объем подложки которых интегрированы печатные катушки и конденсаторы. Для уменьшения габаритных размеров таких фильтров до типоразмера 1206 и достижения высокого уровня повторяемости расчетных и изготовленных характеристик фильтров были применены два подхода: вертикальная компоновка фильтра и новая конструкция катушки индуктивности. На рис. 1 показаны конструкции фильтров нижних частот с частотой среза 500 МГц и сравнительная амплитудно-частотная характеристика электромагнитных моделей этих фильтров.



с многослойной спиральной катушкой индуктивности (а) *с индуктивностью в виде пространственной спирали (б)*

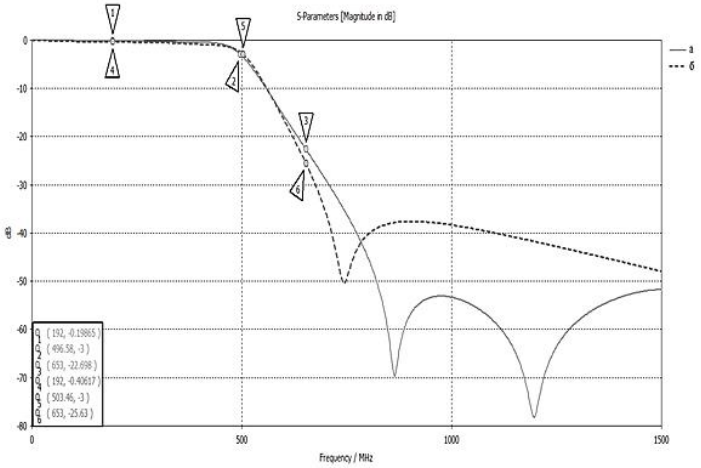
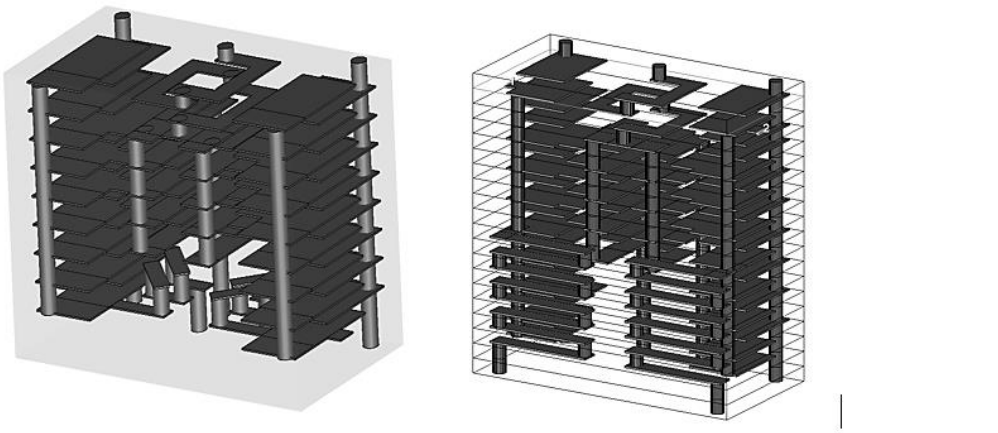


Рис. 1. *Конструкции интегральных фильтров нижних частот и их амплитудно-частотные характеристики*

Как видно из рис. 1 вносимое затухание в полосе пропускания у конструкции с многослойной спиральной катушкой индуктивности и с индуктивностью новой конструкции пространственной спирали имеет одинаковое значение, при этом в полосе задерживания первый вариант конструкции имеет значительное преимущество (более 10 дБ на

частоте 800 МГц). Возможность реализации фильтра типоразмера 1206 с частотой среза 500 МГц и затуханием в полосе задерживания более 50 дБ реализована с применением вертикальной компоновки. Также из приведенной конструкции фильтра можно сделать вывод, что у фильтров с многослойными спиральными катушками индуктивности есть запас для снижения частоты среза (до 450–350 МГц).

Так же был проведен расчет и электромагнитное моделирование полосовых интегральных LC-фильтров с центральной частотой 1690 МГц (рис. 2).



с индуктивностью в виде пространственной спирали (а) *с многослойной стековой катушкой индуктивности (б)*

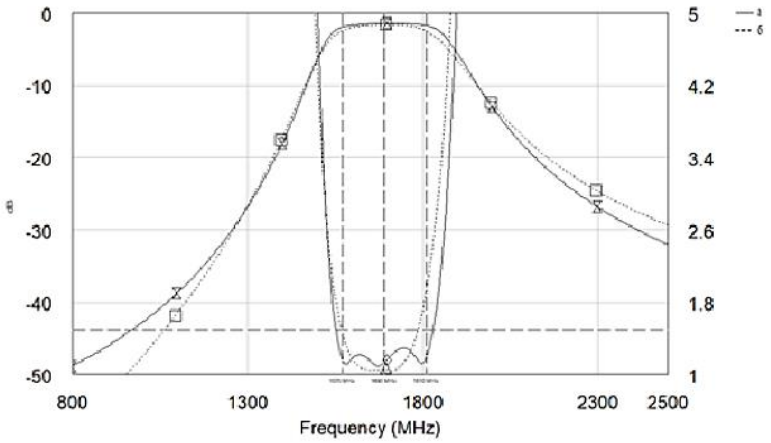


Рис. 2. *Конструкции интегральных полосовых фильтров и их амплитудно-частотные характеристики*

Из полученных результатов моделирования видно, что в полосовом фильтре, в котором использовались пространственные катушки индуктивности потери в полосе пропускания меньше, а КСВн и вносимые потери в полосе задерживания значительно лучше.

Описанные преимущества были достигнуты за счет того, что новая конструкция катушки индуктивности имеет лучшую добротность на высоких частотах, а также позволяет обеспечить более высокие значения индуктивности при меньшем занимаемом объеме.

Таким образом, на основе отечественной керамики СКМ возможно создание миниатюрных керамических фильтров типоразмера 1206. При этом для фильтров нижних частот в низкочастотном диапазоне (от 350 МГц) целесообразно применение типовых конструкций элементов и вертикальной компоновки, а для полосовых – применение совокупности предложенных подходов (вертикальной компоновки и новой конструкции катушки индуктивности) во всем частотном диапазоне.

П. Н. Дробот[1], А. И. Солдатов[1,2]
[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Томск, Российская Федерация
[2]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Томск, Российская Федерация

ПОРОГОВЫЙ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОГО ОСЦИЛЛИСТОРА В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ

Аннотация. Впервые показана возможность работы осциллисторного термочувствительного элемента при питании постоянным напряжением в непрерывном режиме. Отмечены простота и дешевизна производства осциллисторных приборов, построенных на принципах функциональной электроники, что обеспечивает высокий уровень актуальности разработки. Приведены основные характеристики кремниевого осциллисторного порогового термочувствительного элемента, работающего при питании постоянным напряжением от батареек в низкотемпературном интервале (77 ÷ 189) К.
Ключевые слова*:* осциллистор, электрические колебания, частота, пороговый характер.
Для цитирования*:* Дробот П. Н., Солдатов А. И. Пороговый термочувствительный элемент на основе кремниевого осциллистора в непрерывном режиме // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

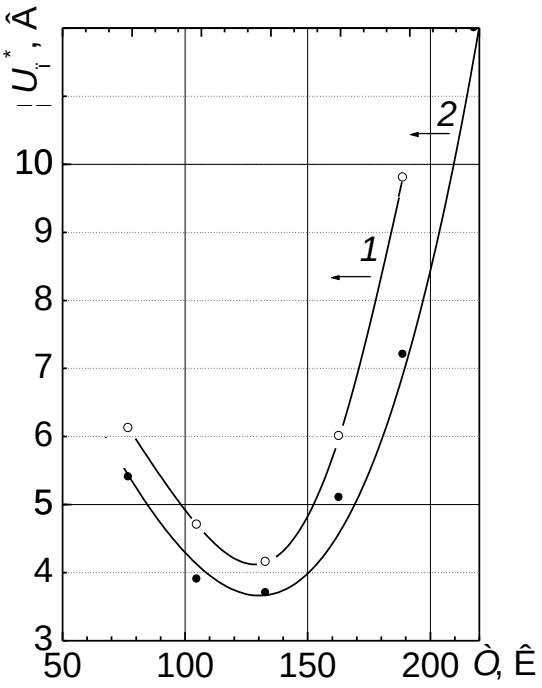
P. N. Drobot[1], A. I. Soldatov[2]
[1]National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation
[2]Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

THRESHOLD THERMOSENSITIVE ELEMENT BASED ON SILICON OSCILLISTOR IN CONTINUOUS MODE

Annotation. This study is the first to demonstrate the capability of an oscillistor-based thermosensitive element to operate continuously when powered by a DC voltage. The simplicity and low cost of manufacturing oscillistor devices based on the principles of functional electronics are highlighted, underscoring the high relevance of this development. The main characteristics of a silicon oscillistor threshold thermosensitive element, powered by a DC voltage from batteries in the low-temperature range (77–189) K, are presented.
Keywords*:* oscillistor, electrical oscillations, frequency, threshold character.
For citation*:* Drobot P. N., Soldatov A. I. Threshold thermosensitive element based on silicon oscillistor in continuous mode // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Осциллисторный эффект, обусловленный возникновением винтовой неустойчивости (ВН) полупроводниковой плазмы, проявляется только при достижении определённых пороговых условий. Для его возникновения к полупроводниковой диодной структуре прикладываются напряжение питания и внешнее магнитное поле, направление которого совпадает с направлением протекания электрического тока. Колебания тока в электрической цепи возникают лишь при определённом сочетании напряжения питания и напряжённости магнитного поля. Эти параметры связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью, а значения порогов их срабатывания дополнительно

зависят от температуры окружающей среды. Если величину магнитного поля в зазоре между постоянными магнитами, в котором расположена осциллисторная структура, поддерживать постоянной (что реализуется с постоянными магнитами FeNdB), то условие возникновения колебаний будет определяться преимущественно температурой. Благодаря этому такая полупроводниковая структура может быть использована в качестве температурно-чувствительного прибора, выполняющего функцию порогового температурного ключа.



Температурная зависимость порогового напряжения:
1) в непрерывном режиме при питании постоянным напряжении;
2) в импульсном режиме питания осциллистора

На рисунке показаны зависимости порогового напряжения от температуры, при которых пороговый термочувствительный элемент начинает генерировать электрические колебания. Кривая 1 на рисунке соответствует непрерывной работе при питании постоянным напряжением. Кривая 2 на рисунке соответствует работе при питании импульсным напряжением. Если, например, зафиксировать напряжение 8,5 В в импульсном режиме, то при $T > 200$ К колебания в цепи осциллистора будут отсутствовать, а при $T \leq 200$ К возникнет генерация с частотой 325 кГц. Соответственно, для непрерывного режима такая же ситуация реализуется при напряжении 8,0 В, когда при $T > 175$ К, колебания в цепи осциллистора будут отсутствовать, а при $T \leq 175$ К возникнет генерация с частотой 400 кГц. По возникновению генерации судят о срабатывании температурного ключа. Наличие минимума на зависимости $U_п^*$ от T при $T = 125$ К определяет возможность «двойного» срабатывания ключа в интервале температур от 77 до 172 К при $U^* < 5{,}3$ В в импульсном режиме. В непрерывном режиме такая же ситуация реализуется при напряжении 6 В в интервале температур от 77 до 163 К.

Однако реальное значение температуры можно определить по значению частоты генерации, которые в несколько раз отличаются друг от друга в области температур слева и справа от минимума при $T = 120$ К. Это потребует измерения частоты, что усложнит регистрирующую схему. Поэтому проще и выгоднее использовать описанный пороговый термочувствительный элемент в области температур от 120 К и выше. В частно-

сти экспериментально установлено, что при питании постоянным напряжением от любых батареек (АА, ААА, «Крона» и других) его можно использовать как пороговый ключ в интервале температур 77÷189 К.

Достижение возможности работы кремниевого осциллистора в традиционном режиме питания постоянным напряжением позволяет получать непрерывную генерацию осциллисторного сигнала. Это дает возможность применения кремниевых осциллисторных структур в том числе как традиционные генераторы высокочастотного сигнала. Причем установлено, что переход от кремния к арсениду галлия при одинаковом напряжении питания позволит существенно повысить частоту генерации до 13,5 ГГц при комнатной температуре. При низких температурах частота в арсенид-галлиевых осциллисторных структурах будет на порядок выше и составит сотни гигагерц.

При охлаждении увеличивается подвижность носителей (в арсениде галлия при 77 К она может достигать десятков тысяч $см^2/(В·с)$), а тепловое рассеяние плазменных возмущений снижается. Это делает осциллисторные структуры, работающие в непрерывном режиме, перспективными для криогенной электроники, включая квантовые вычислительные системы, где требуются высокочастотные контрольные сигналы при температуре жидкого азота или ниже.

Непрерывный режим питания и малые размеры активной области (десятки микрометров) делают осциллисторные структуры пригодными для интеграции в полупроводниковые чипы — как функциональные элементы сверхвысокочастотных генераторов, гетеродинов, сенсорных массивов на единой подложке. Особенно перспективны гибридные кремний/арсенид-галлиевые решения, где кремниевая часть обеспечивает управление и обработку, а арсенид-галлиевая – высокочастотную генерацию.

Следует отметить, что технология изготовления кремниевого осциллисторного порогового термочувствительного элемента является сравнительно простой и не требует применения дорогостоящих высокотехнологичных процессов, характерных для современной микроэлектроники. Это упрощает его производство, снижает потенциальную себестоимость и обусловливает практический интерес к использованию данного полупроводникового прибора как в качестве термочувствительного элемента порогового действия, так и других приборов.

И. А. Евмененко
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА ЦЕПИ ТЕРМОКОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА

Аннотация. В работе рассматривается разработка цепи термокомпенсирующего устройства для кварцевого генератора с целью повышения стабильности частоты при изменении температуры. Проведён теоретический анализ влияния температурных колебаний на параметры генератора и его частотозадающих элементов. Выполнен расчёт и проектирование схемы кварцевого автогенератора, буферного усилителя и цепи управления частотой. Особое внимание уделено синтезу устройства температурной компенсации, включая расчёт термозависимого потенциометра по методике, разработанной АО «ОНИИП». Предложенная схема обеспечивает автоматическую корректировку параметров генератора, что позволяет снизить дрейф частоты в широком диапазоне температур и соответствует требованиям технического задания по нестабильности частоты.
Ключевые слова: кварцевый генератор, температурная компенсация, термокомпенсирующее устройство, стабильность частоты, термозависимый потенциометр, варикап, АТ-срез.
Для цитирования: Евмененко И.А. Разработка цепи термокомпенсирующего устройства для кварцевого генератора // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

I. A. Evmenenko
[1] Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (Omsk)

DEVELOPMENT OF A THERMAL COMPENSATION CIRCUIT FOR A QUARTZ CRYSTAL OSCILLATOR

Annotation. The work considers the development of a thermal compensation circuit for a quartz crystal oscillator to improve frequency stability under temperature variations. A theoretical analysis of the impact of temperature fluctuations on the oscillator parameters and its frequency-determining elements was carried out. The design and calculation of the quartz crystal oscillator circuit, buffer amplifier, and frequency control circuit were performed. Special attention is paid to the synthesis of the temperature compensation device, including the calculation of a thermally sensitive potentiometer using the methodology developed by JSC “ONIIP”. The proposed circuit provides automatic correction of oscillator parameters, which reduces frequency drift over a wide temperature range and meets the technical specifications for frequency stability.
Keywords: quartz crystal oscillator, temperature compensation, thermal compensation circuit, frequency stability, temperature-dependent potentiometer, varactor, AT-cut.
For citation: Evmenenko I. A. Development of a Thermal Compensation Circuit for a Quartz Crystal Oscillator // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Кварцевые генераторы являются основными источниками опорных колебаний в радиоэлектронных устройствах, однако их частотная стабильность критично зависит от температуры окружающей среды. Одним из наиболее эффективных способов миними-

зации температурных отклонений частоты является применение активных схем термокомпенсации. Целью работы является разработка и практическая реализация цепи термокомпенсирующего устройства, обеспечивающего стабильную работу генератора в заданном диапазоне температур с нестабильностью частоты не более $\pm 2 \cdot 10^{-6}$.

Теоретический анализ и расчёт генераторной части

На основе требований технического задания (номинальная частота 10 МГц, АТ-срез кварцевого резонатора yxl/+35°06') выполнен расчёт кварцевого автогенератора по схеме ёмкостной «трёхточки». Также рассчитан буферный каскад с комбинированной отрицательной обратной связью, обеспечивающий развязку автогенератора от нагрузки и формирование выходного сигнала в виде усечённого синуса.

Синтез устройства температурной компенсации. Ключевым этапом работы является синтез генератора термокомпенсирующей функции. Определена расчётная управляющая характеристика – зависимость напряжения на варикапе от температуры, необходимая для поддержания номинальной частоты. Основой практической реализации служит схема термозависимого потенциометра (ТЗП), состоящая из набора резисторов и трёх терморезисторов с различными температурными коэффициентами. Расчёт элементов ТЗП выполнен по методике разработанной АО «ОНИИП», которая обеспечивает подбор номиналов для минимизации отклонений формируемого напряжения от эталонной функции термокомпенсации. Проведено моделирование разработанной схемы в среде Micro-Cap, подтвердившее точность компенсации и её соответствие расчётным данным (рис. 1).

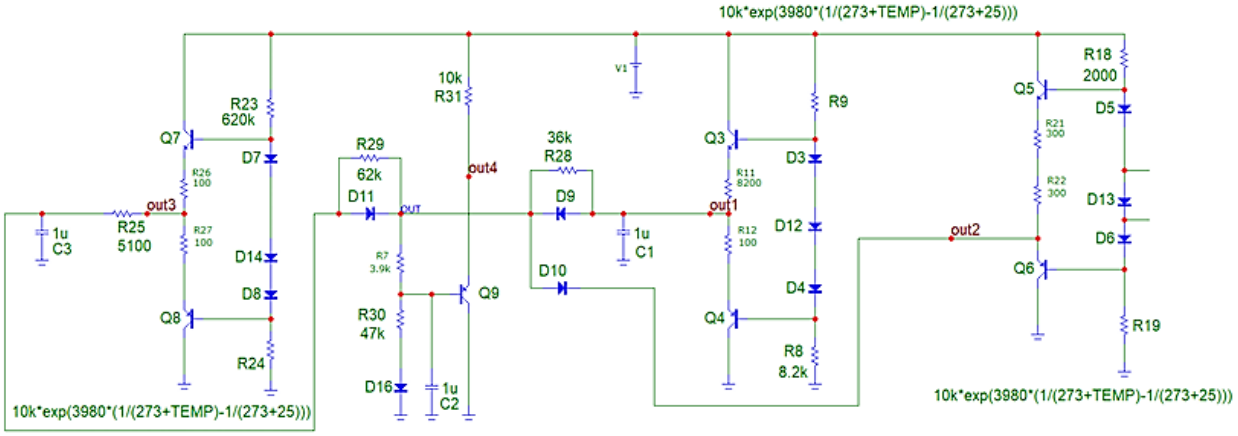


***Рис. 1**. Схема ТЗП, смоделированная в программе Micro-Cap*

Описание работы схемы термокомпенсирующего устройства: благодаря применению диодов и эмиттерных повторителей уменьшено взаимовлияние термокомпенсирующих цепей по участкам температурных поддиапазонов.

Сравнение результатов

График всех трёх расчётов напряжения на выходе ТЗП, представленный на рис. 2, иллюстрирует сравнительный анализ различных моделей. Данный график позволяет оценить эффективность каждой из схем. По данному графику можно сделать вывод, что график, который получился в Micro-Cap (U1), почти совпадает с графиком, полученным при расчёте (Uy(T)). Это свидетельствует о высоком уровне точности компенсации, полученных с помощью ТЗП1. Однако график, полученный по методике расчёта разработанным АО «ОНИИП» (ТЗП2), демонстрирует некоторые расхождения с требуемой характеристикой.

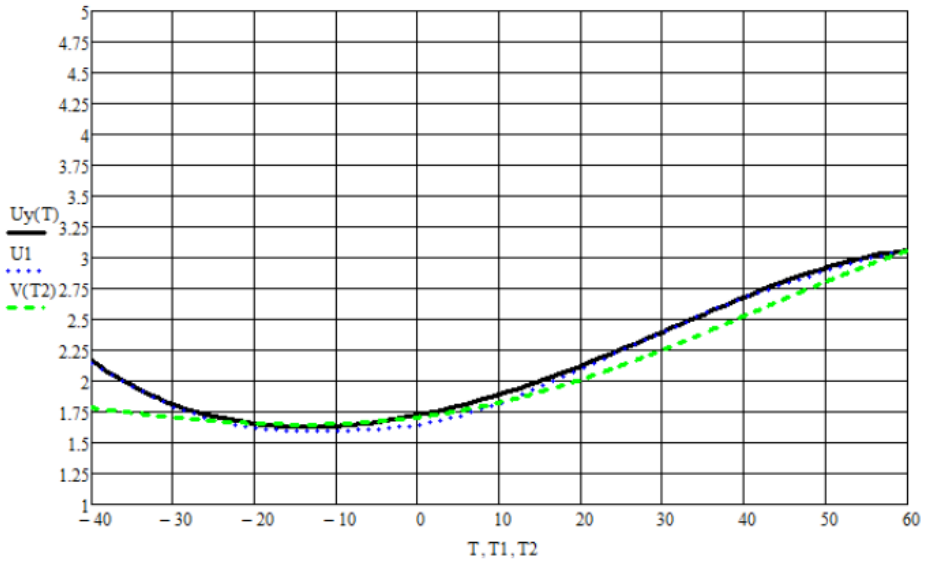


***Рис. 2**. График всех трёх расчётов напряжения на выходе ТЗП*

Эти отклонения могут быть обусловлены особенностями методики или предположениями, использованными в расчётах, что подчеркивает важность выбора правильных инструментов и методов для анализа электрических цепей. Таким образом, результаты различных подходов к расчету напряжения показывают, что для достижения максимально точных данных стоит использовать несколько методов и проводить их сравнительный анализ.

Заключение

Разработана и промоделирована цепь термокомпенсирующего устройства, которая обеспечивает автоматическую коррекцию параметров кварцевого генератора при изменении температуры окружающей среды. Это позволяет снизить дрейф частоты и достичь требуемой стабильности частоты сигнала. Предложенное решение может быть использовано в радиоэлектронных системах с высокими требованиями к точности и стабильности сигнала, таких как радиопередатчики, системы синхронизации и GPS-приёмники. Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией схемы для снижения энергопотребления и её интеграцией в виде специализированной интегральной схемы.

Ю. И. Егошин, А. И. Тюменцев, А. Н. Яковлев
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СПИРАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Аннотация. В рамках работы проведено исследование влияния отклонений геометрических параметров интегральных спиральных резонаторов, выполненных по технологии низкотемпературной керамики совместного обжига, на их частотные характеристики. Полученные результаты помогут упростить задачу проектирования таких резонаторов и устройств на их основе.
***Ключевые слова**:* интегральный спиральный резонатор, LTCC, частотная характеристика, электромагнитное моделирование.
***Для цитирования**:* Егошин Ю. И., Тюменцев А. И., Яковлев А. Н. Исследование влияния изменения геометрических параметров на характеристики интегральных спиральных резонаторов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

Y. I. Egoshin, A. I. Tyumentsev, A. N. Yakovlev
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CHANGES IN GEOMETRIC PARAMETERS ON THE CHARACTERISTICS OF INTEGRATED SPIRAL RESONATORS

Annotation. As part of the work, a study was conducted to investigate the effect of deviations in the geometric parameters of integrated spiral resonators made using low-temperature ceramic joint-sintering technology on their frequency characteristics. The obtained results will help simplify the task of designing such resonators and devices based on them.
***Keywords**:* integrated spiral resonator, LTCC, frequency response, electromagnetic modeling.
***For citation**:* Egoshin Y. I., Tyumentsev A. I., Yakovlev A. N. Investigation of the effect of changes in geometric parameters on the characteristics of integrated spiral resonators // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Как известно, миниатюрные интегральные устройства селекции частот, выполненные по технологии низкотемпературной керамики совместного обжига, обладают стабильными электрическими параметрами и механической прочностью. В число данных устройств входят спиральные резонаторы, интегрированные в керамическую подложку и являющиеся аналогами классических спиральных резонаторов на диэлектрическом каркасе. Однако их изготовление сопровождается рядом проблем. Так, например, из-за специфики технологического процесса возникают неточности изготовления на этапах трафаретной печати, изостатического ламинирования стека и обжига, что приводит к отклонению реальных электрических параметров резонаторов от расчетных значений. Кроме того, особую сложность представляет собой отсутствие возможности подстройки интегральных резонаторов после их изготовления. Поэтому важной задачей становится определение степени чувствительности частотных характеристик к отклонениям конструктивных параметров.

В работе на примере двух интегральных спиральных резонаторов с резонансными частотами 456 МГц и 2320 МГц, выполненных по технологии керамики с низкой температурой обжига, проведено исследование зависимости частотных характеристик от изменения диаметра спирали, ширины проводника и расстояния между витками резонатора на величину до 10% относительно исходных значений.

Для расчета рассматриваемых в работе резонаторов были применены формулы, характерные для классических спиральных резонаторов на диэлектрическом каркасе. При этом были учтены особенности технологии, которая имеет свои ограничения при производстве. Так, например, в качестве шага намотки спирали τ выступает толщина керамического листа или кратная ей величина. За диаметр проводника dп была принята ширина печатного полоска, а за толщину стенки каркаса - внутренний диаметр спирали.

Результатом расчета являются резонаторы, изображенные на рис. 1.

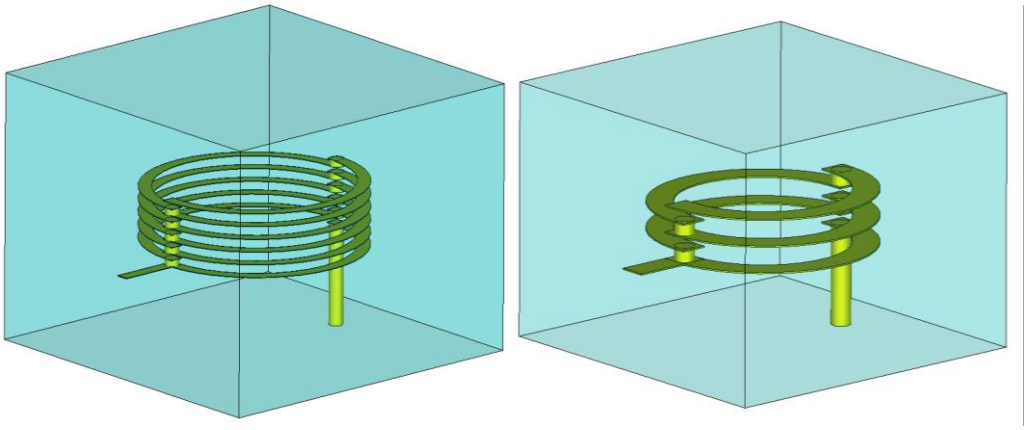


Рис. 1. *Конструкции интегральных спиральных резонаторов на частоты 456 и 2320 МГц*

Как видно на рис. 1, конструкция представляет собой спираль, интегрированную в керамическую подложку, при этом один конец замнут на нижний экран, а другой – свободный. Итоговые габаритные размеры составили 5,3х5,3х4,2 мм для резонатора с частотой 456 МГц и 2,5х2,5х1,9 мм для резонатора с частотой 2320 МГц. В качестве материала выступает отечественная керамика СКМ.

На основе разработанных конструкций было проведено электромагнитное моделирование, результатами которого являются графики S_{11} (рис. 2).

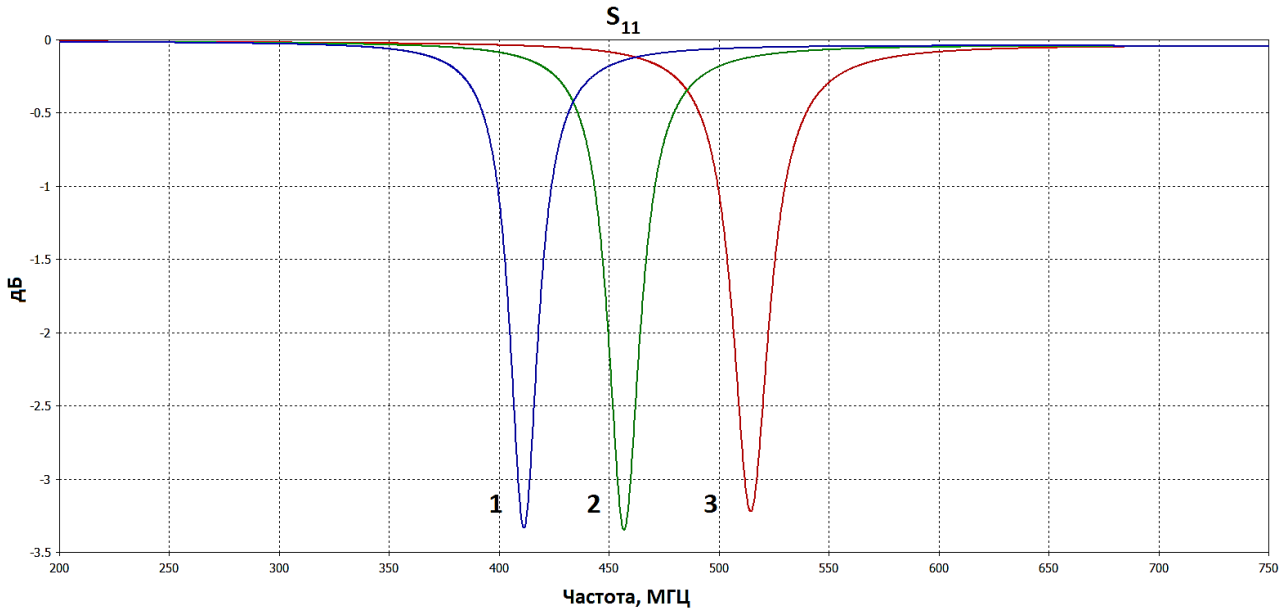


Рис. 2. *S_{11} для диаметров спирали: 1 – 3,81 мм; 2 – 3,5 мм; 3 – 3,19 мм*

Выявлено, что из рассмотренных в работе геометрических параметров наиболее существенное влияние на характеристики резонатора оказывает отклонение диаметра спирали в диапазоне ±10%.

Результаты, полученные в данной работе, могут упростить задачу проектирования и итерационной подстройки на стадии моделирования интегральных спиральных резонаторов и устройств на их основе.

Н. М. Жилин[1,2], Т. Н. Улаева[1,2,3], А. Ю. Куклев[1,2,3]
Н. А. Чириков[1,2], Ю. С. Зонова[1,2], А. Н. Кузнецов[1,2]
[1]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация
[3]Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО ОАВ-РЕЗОНАТОРА С РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТОЙ 7 ГГц

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования температурной стабильности микроэлектронного ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем на основе пленок Mo-Al-SiO_2 и пьезоэлектрической пленки AlN, работающего на частоте, близкой к 7 ГГц. Исследованы изменения электрических характеристик при нагреве и охлаждении в диапазоне от комнатной температуры до 100 ºС. Определен температурный коэффициент частоты, равный $-32 \cdot 10^{-6}$ 1/ºС.
Ключевые слова*:* микроэлектронный ОАВ-резонатор, брэгговский отражатель, объемная акустическая волна, температурный коэффициент частоты.
Для цитирования*:* Жилин Н. М., Улаева Т. Н., Куклев А. Ю., Чириков Н. А., Зонова Ю. С., Кузнецов А. Н. Исследование влияния температуры на частотные характеристики микроэлектронного ОАВ-резонатора с резонансной частотой 7 ГГц // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

N. M. Zhilin[1,2], T. N. Ulaeva[1,2,3], A. Yu. Kuklev[1,2,3]
N. A. Chirikov[1,2], Yu. S. Zonova[1,2], A. N. Kuznetsov[1,2]
[1]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation
[3]Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF A MICROELECTRONIC BAW RESONATOR WITH A RESONANT FREQUENCY OF 7 GHz

Annotation. The paper presents an experimental study of the temperature stability of a microelectronic BAW resonator with a Mo-Al-SiO_2 Bragg reflector and an AlN piezoelectric film operating at about 7 GHz. Changes in the electrical characteristics were measured during heating and cooling from room temperature to 100 ºC. The temperature coefficient of frequency was found to be $-32 \cdot 10^{-6}$ 1/ºC.
Keywords*:* bulk acoustic wave (BAW), microelectronic BAW resonator, Bragg reflector, temperature coefficient of frequency (TCF).
For citation*:* Zhilin N. M., Ulaeva T. N., Kuklev A. Yu., Chirikov N. A., Zonova Yu. S., Kuznetsov A. N. Investigation of the effect of temperature on the frequency characteristics of a microelectronic BAW resonator with a resonant frequency of 7 GHz // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Современные устройства систем связи и высокоскоростной передачи данных требуют освоения все более высоких рабочих частот, включая диапазон порядка 10 ГГц и выше. Развитие таких устройств напрямую связано с совершенствованием существующих и созданием новых функциональных элементов, обеспечивающих частотную селекцию и генерацию СВЧ сигналов. Одним из перспективных направлений является применение устройств на объемных акустических волнах (ОАВ).

При переходе ОАВ-резонаторов в высокочастотный диапазон особое значение приобретает их температурная стабильность. Даже при неизменном нормированном температурном коэффициенте частоты абсолютный температурный дрейф резонансной частоты возрастает пропорционально рабочей частоте устройства. В связи с этим исследование температурных характеристик высокочастотных ОАВ-резонаторов представляет практический интерес.

Целью работы является исследование температурных зависимостей электрических параметров микроэлектронного ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем.

В работе исследовались экспериментальные образцы ОАВ-резонаторов с брэгговским отражателем на основе пьезоэлектрических пленок нитрида алюминия, работающих на частоте близкой к 7 ГГц. Брэгговский отражатель состоял из трех пар слоев молибдена и алюминия и одной пары слоев молибден-диоксид кремния. Далее такую конструкцию будем обозначать как отражатель Mo-Al-SiO_2. Резонаторы формировались на кремниевых подложках КДБ-10. В качестве тонкопленочных электродов использовались пленки алюминия. Формирование тонкопленочной структуры осуществлялось методом магнетронного распыления, а топология резонаторов создавалась с применением процесса фотолитографии.

Для исследования температурных характеристик изготовленные образцы ОАВ-резонаторов размещали на платформе, обеспечивающей контроль температуры в реальном времени. Нагрев осуществлялся техническим феном ФЭ-2000ЭД с функцией стабилизации температуры выходящего воздушного потока. Источник нагрева располагался на расстоянии 5 см от платформы. Измерения проводились в диапазоне от комнатной температуры до 100 °С с шагом 10...20°С. Электрические характеристики регистрировались как в процессе нагрева, так и при естественном охлаждении образцов.

Измерение электрических параметров резонаторов проводилось с помощью векторного анализатора электрических цепей Agilent E5071C.

Для исследованных образцов ОАВ-резонаторов с брэгговским отражателем Mo-Al-SiO_2 были получены следующие электрические параметры:

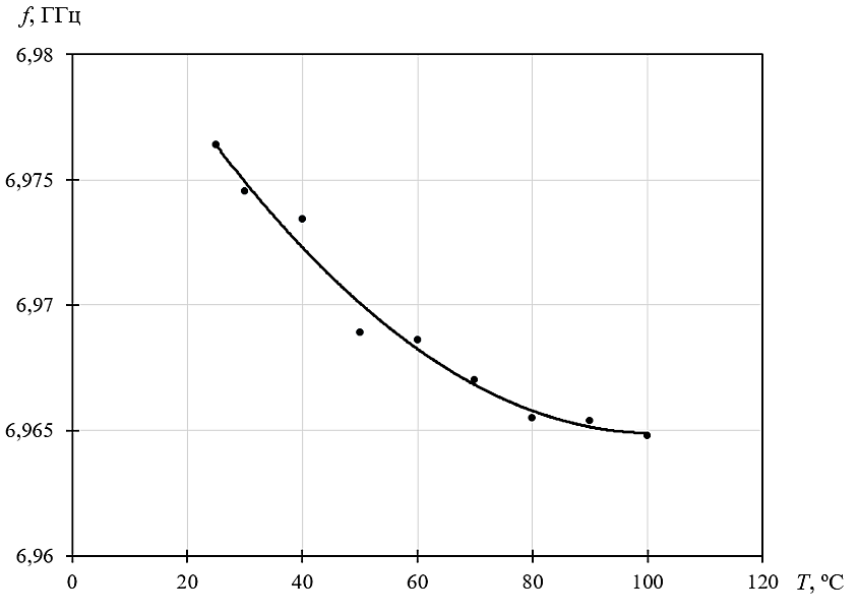
- резонансная частота – 6,9…7 ГГц;
- резонансный промежуток составил около 80 МГц;
- добротность – 190...200;
- активная проводимость на частоте последовательного резонанса – 90...100 мСм;
- минимальное значение коэффициента отражения – от -27 до -30 дБ;
- модули входного электрического импеданса на частотах последовательного и параллельного резонансов составляли 8…10 Ом и 65...75 Ом, соответственно.

На рисунке представлена экспериментальная зависимость частоты последовательного резонанса от температуры.

С повышением температуры наблюдалось последовательное смещение частоты резонанса в низкочастотную область. Аналогичный характер изменения частотных характеристик регистрировался как при нагреве, так и при последующем охлаждении образцов. Температурное воздействие также сопровождалось изменением коэффициента отражения, что свидетельствует об изменении электрических характеристик резонатора в исследованном температурном диапазоне.

По экспериментальной зависимости частоты последовательного резонанса от тем-

пературы был рассчитан температурный коэффициент частоты исследуемых ОАВ-резонаторов, который составил $-32 \cdot 10^{-6}$ 1/ºС. Для резонансной частоты около 7 ГГц полученное значение соответствует температурному сдвигу частоты около -0,22 МГц/ºС.



Температурная зависимость частоты последовательного резонанса ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем Mo-Al-SiO_2

Таким образом, результаты исследования показывают необходимость учета температурного дрейфа частоты при разработке высокочастотных микроэлектронных ОАВ-резонаторов и устройств на их основе.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер регистрации проекта 124022500291-6).

В. И. Карагусов[1], С. А. Доберштейн[1,2]
[1]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

ГЕНЕРАТОР, УПРАВЛЯЕМЫЙ НАПРЯЖЕНИЕМ, НА ЧАСТОТУ 993 МГц С ДВУХВХОДОВЫМ STW-РЕЗОНАТОРОМ

Аннотация. Представлены результаты исследования генератора, управляемого напряжением с фазовращателем на частоту 993 МГц с двухвходовым STW-резонатором на срезе кварца YX/36°+90°. Генератор выполнен по фильтровой схеме из усилителя с обратной связью с эквивалентной линией задержки -двухвходовым резонатором и управляемым L-C-L фазовращателем. Схема генератора оптимизирована с помощью компьютерного моделирования на основе анализа АЧХ и ФЧХ разомкнутой петли обратной связи. Генератор показал перестройку центральной частоты 993 МГц в пределах 0,156–0,46 МГц при использовании 1-3 C-L-C звеньев фазовращателя и изменении управляющего напряжения от 0 до 20 В. Уровень спектральной плотности мощности шумов ГУН составил -120 дБ/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц.
Ключевые слова*:* генератор, управляемый напряжением, двухвходовый резонатор на STW, фазовращатель.
Для цитирования*:* Карагусов В. И., Доберштейн С. А., Генератор, управляемый напряжением, на частоту 993 МГц с двухвходовым STW-резонатором // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества: тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

V. I. Karagusov[1], S. A. Doberstein[1,2]
[1]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radio physics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

993 MHz VOLTAGE CONTROLLED OSCILLATOR WITH TWO-PORT STW RESONATOR

Annotation. The results of a study of a 993 MHz a voltage controlled oscillator with the phase shifter and two-port STW resonator on a 36°YX90° quartz cut are presented. The oscillator is was build using a filter circuit consisting of an amplifier with feedback and an equivalent delay line - a two-port resonator - and a controlled L-C-L phase shifter. The oscillator circuit was optimized using computer simulation based on the analysis of the open-loop frequency and phase responses. The oscillator was shown tuning of the central frequency within the range of 0,156–0,46 MHz using 1-3 C-L-C phase shifter sections and varying the control voltage from 0 to 20 V. The phase noise of -120 dB/Hz at an offset of 10 kHz from away the carrier of the VCO was ob-tained
Keywords*:* voltage controlled oscillator, STW two-port resonator, phase shifter.
For citation*:* Karagusov V. I., Doberstein S. A. 993 MHz voltage controlled oscillator with two-port STW resonator// Radiophysics, photonics and research into the properties of matter : Abstracts of the IV International Scientific and Technical Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONII, 2026.

Для СВЧ-генераторов широко используются двухвходовые резонаторы на поверхностных поперечных волнах (Surface Transverse Waves-STW). STW на кварце имеет высокую скорость распространения V=5000 м/с, за счет чего ширина электродов и зазоров встречно-штыревых преобразователей (ВШП) STW-резонатора равна 1,25 мкм для рабочей частоты f_0=1000 МГЦ. Это облегчает изготовление резонаторов и повышает повторяемость их параметров. В работе представлен генератор, управляемый напряжением (ГУН) на среднюю рабочую частоту f_0=993 МГЦ с резонатором на STW. Для STW-резонатора используется двухвходовая структура, состоящая из входного и выходного ВШП, размещенных в резонансной полости между двумя отражательными решетками. STW-резонатор изготовлен на пьезоподложке из кварца среза YX/36°+90°, где распространяется STW.

ГУН на двухвходовом резонаторе представляют собой фильтровую схему, состоящую из усилителя, в цепи обратной связи (ОС) которого включены эквивалентная линия задержки (ЛЗ)–двухвходовый резонатор и управляемый фазовращатель. Генерация в этой схеме возникает при балансе амплитуд ($\Delta A \geq 1$) и балансе фаз ($\Delta\varphi=2\pi n$, n=0, ±1, ±2), где ΔA и $\Delta\varphi$ – коэффициент усиления по мощности, фазовый сдвиг в усилителе, ЛЗ и фазовращателе в ОС ГУН. Фазовращатель в полосе пропускания ЛЗ по уровню -3 дБ $\Delta f_{-3дБ}$ обеспечивает из условия баланса фаз подстройку генератора на заданную рабочую частоту f_0. Таким образом, зная полосу пропускания ЛЗ $\Delta f_{-3дБ}$ и фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ в этой полосе, можно оценить максимальную перестройку центральной частоты генератора за счет фазового сдвига управляемого фазовращателя управляемого фазовращателя. У типового двухвходового STW-резонатора на f_0 = 993 МГц фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ = 130° в полосе пропускания $\Delta f_{-3дБ}$ = 740 кГц. При использовании управляемого фазовращателя со сдвигом фаз $\Delta\varphi$ = 130° можно достичь максимальную перестройку рабочей частоты генератора на Δf = 740 кГц или в относительных единицах: $\Delta f/f_0$ = 0,074%.

Оптимизация схемы генератора проводится на основе анализа АЧХ и ФЧХ разомкнутой петли обратной связи. Критериями генерации на заданной частоте f_0 является баланс амплитуд и баланс фаз. Моделирование АЧХ и ФЧХ разомкнутой петли автогенератора проводится на основе специального программного обеспечения, учитывающего параметры транзистора, эквивалентные параметры STW-резонатора, фазовращателя. Представлены результаты моделирования и экспериментальные данные макета генератора на частоту f_0=993 МГц. В качестве ЛЗ использовался двухвходовый резонатор на STW с вносимыми потерями 6-7 дБ, $\Delta f_{-3дБ}$ = 740 кГц. Электронный фазовращатель выполнялся на Т-образном C-L-C звене, образованном индуктивностью и двумя варикапми BB639A с управляющим напряжением 0–20 В.

Расчёты и эксперименты показали, что макет Т-образного C-L-C звена обеспечивает вносимые потери не более 2 дБ, сдвиг фаз около 40° при изменении управляющего напряжения 0-20 В. При анализе разомкнутой цепи ОС состоящей из усилителя, двухвходового резонатора и фазовращателя получено пересечение оси 0° ФЧХ в двух точках с разницей между ними 0,156 МГц при неравномерности АЧХ <3 дБ, что представляет собой диапазон перестройки ГУН при использовании одного C-L-C звена фазовращателя при двух значениях управляющего напряжения 0 и 20 В. Когда используется 3 C-L-C звена с фазовым сдвигом около 110°, разница между точками пересечения 0° ФЧХ будет равна 0,46 МГц при тех же значениях управляющего напряжения, что и является диапазоном перестройки ГУН. Генератор с двухвходовым STW-резонатором показал, что перестройка центральной частоты 993 МГц составила 0,156–0,46 МГц при использовании 1-3 C-L-C звеньев фазовращателя и изменении управляющего напряжения от 0 до 20 В. Уровень спектральной плотности мощности шумов ГУН составил -120 дБ/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 124022500291-6).

Н. В. Кобылянский[1], С. А. Доберштейн[1,2], И. В. Хоменко[3]
[1]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[2] Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация
[3]Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ГЕНЕРАТОР НА ЧАСТОТУ 1000 МГц С ОДНОВХОДОВЫМ РЕЗОНАТОРОМ НА STW

Аннотация. Представлены результаты исследования перестраиваемого генератора с варикапом на частоту 1000 МГц с одновходовым STW-резонатором на срезе кварца YX/36°+90°. Для генератора использовалась схема Колпитца - ёмкостная трёхточка. В этой схеме индуктивность заменяется STW-резонатором с индуктивным сопротивлением. Последовательно подключается варикап, ёмкость которого определяется изменением управляющего напряжения. Схема генератора оптимизирована с помощью компьютерного моделирования на основе анализа АЧХ и ФЧХ разомкнутой петли обратной связи. Генератор показал перестройку центральной частоты на 0,12 МГц при изменении управляющего напряжения на варикапе от 0 до 28 В. Уровень спектральной плотности мощности шумов ГУН составил -120 дБ/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц.
Ключевые слова*:* генератор, управляемый напряжением, одновходовый резонатор на STW, емкостная трехточка, варикап.
Для цитирования*:* Кобылянский Н. В., Доберштейн С. А., Хоменко И. В. Перестраиваемый генератор на частоту 1000 МГц с одновходовым резонатором на STW // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

N. V. Kobylyansky[1], S. A. Doberstein[1,2], I. V. Khomenko[3]
[1]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radio physics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation
[3]Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

1000 MHz TUNABLE OSCILLATOR WITH A SINGLE-PORT STW RESONATOR

Annotation. The results of a study of a 1000 MHz tunable oscillator with the varicap and single-port STW resonator on the 36°YX90° quartz cut are presented. The Colpitts circuit - a capacitive three-point circuit - was used for the oscillator. In this circuit the inductance is replaced by the STW resonator with an inductive impedance. The varicap is connected in series, and its capacitance is determined by the change in the control voltage. The oscillator circuit was optimized using computer simulation based on the analysis of the open-loop frequency and phase responses. The oscillator was shown a tuning the central frequency to 0.12 MHz when the control voltage on the varicap was changed from 0 to 28 V. The phase noise of -120 dB/Hz at an offset of 10 kHz from away the carrier of the VCO was obtained
Keywords*:* voltage controlled oscillator, STW single-port resonator, capacitive three-point circuit, varicap.
For citation*:* Kobylyansky N. V., Doberstein S. A., Khomenko I. V. 1000 MHz tunable oscillator with a single-port STW-resonator // Radiophysics, photonics and research into the properties of matter: Abstracts of reports of the IV International Scientific and Technical Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Преимущества генераторов на резонаторах поверхностных акустических волн (ПАВ) широко известны: малые габариты, высокие рабочие частоты, высокая температурная стабильность при использовании рэлеевской ПАВ на кварце. Для создания генераторов, управляемых напряжением (ГУН) на ПАВ широко используют варикапы. При этом относительная перестройка центральной частоты f_0 ГУН определяется разностью Δf между резонансной и антирезонансной частотами резонатора. Однако для создания генераторов на частоту f_0 = 1000 МГц требуется резонаторы на ПАВ с шириной электродов и зазоров встречно-штыревого преобразователя (ВШП) равной 0,79 мкм. Такие резонаторы очень сложно изготавливать и обеспечивать высокую повторяемость параметров.

В этой связи перспективно использовать поверхностные поперечные волны (Surface Transverse Waves — STW), у которых на кварце скорость акустической волны примерно в 1,6 раза выше, чем у рэлеевской ПАВ. В этом случае ширина электродов и зазоров ВШП резонаторов становится равной 1,25 мкм, что облегчает изготовление резонаторов и повышает повторяемость их параметров. В работе представлен ГУН на частоту f_0 = 1000 МГц с резонатором на STW. В качестве STW-резонатора используется одновходвая конфигурация, состоящая из ВШП, размещённого в резонансной полости между двумя отражательными решётками. STW-резонатор изготовлен на пьезоподложке из кварца среза YX/36°+90°, где распространяется STW со скоростью V=5000 м/с. В качестве схемы генератора использовалась схема Колпитца на биполярном транзисторе - ёмкостная трёхточка. В этой схеме индуктивность заменяется STW-резонатором с индуктивным сопротивлением, при этом последовательно подключается варикап, ёмкость которого определяется изменением управляющего напряжения. В этом случае частота генератора регулируется и находится в пределах между резонансной и антирезонансной частотами STW-резонатора.

Ёмкость варикапа обеспечивает из условия баланса фаз подстройку генератора на заданную рабочую частоту f_0. Таким образом, зная разность между резонансной и антирезонансной частотами STW-резонатора, можно оценить максимальную перестройку частоты генератора. У типового одновходового STW-резонатора на 1000 МГц разность между резонансной и антирезонансной частотами составляет 0,3 МГц. При использовании варикапа с изменяющейся ёмкостью можно достичь максимального значения перестройки рабочей частоты генератора f_0 на Δf = 0,3 МГц или в относительных единицах: $\Delta f/f_0$ = 0,03%. Оптимизация схемы генератора проводится на основе анализа амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазо-частотной характеристики (ФЧХ) разомкнутой петли обратной связи (ОС). Критериями генерации на заданной частоте f_0 является усиление по мощности в разомкнутой петле ОС не менее 1 (баланс амплитуд) и сдвиг фаз, кратный 360° (баланс фаз).

Моделирование АЧХ и ФЧХ разомкнутой петли ОС автогенератора проводится на основе специального программного обеспечения, учитывающего параметры транзистора, эквивалентные параметры STW-резонатора, контурные ёмкости схемы и ёмкости варикапа. В качестве одновходового резонатора использовался резонатор на STW с добротностью Q=10000. Варикап 2В173А9 при изменении управляющего напряжения от 0 до 28 В обеспечивает ёмкость от 2 до 20 пФ. При анализе разомкнутой цепи ОС, состоящей из усилителя, одновходового резонатора и варикапа получено усиление > 0 дБ с неравномерностью 3 дБ, пересечение оси 0° ФЧХ в двух точках с разницей частот между ними 0,12 МГц с неравномерностью АЧХ <2 дБ. Эта разница представляет собой диапазон перестройки ГУН при использовании варикапа с изменением управляющего напряжения от 0 до 28 В. Генератор с одноходовым STW-резонатором показал перестройку центральной частоты на 0,12 МГц. Уровень спектральной плотности мощности шумов ГУН составил -120 дБ/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 124022500291-6).

В**. Н. Корж, С. П. Букин, М. А. Михайлов, С. В. Крутиев**
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ВОЛНОВОДНЫЙ КВАЗИЭЛЛИПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР НА КАСКАДЕ ГРЕБНЕВЫХ СИНГЛЕТОВ

Аннотация. В работе производится синтез и электродинамический анализ волноводного полосно-пропускающего фильтра седьмого порядка с квазиэллиптическим откликом и центральной частотой 6,5 ГГц. Разработанное устройство имеет четыре полюса, по два с каждой стороны полосы пропускания. Фильтр собран как каскад синглетов – прямоугольных гребней, каждый из которых несёт собственный резонанс и ноль передачи: повёрнутые гребни уводят нули выше полосы, поперечные – ниже.
Ключевые слова: волноводный фильтр, синглет, гребневый резонатор, нуль передачи, квазиэллиптическая характеристика, коэффициент связи
Для цитирования: Корж В. Н., Букин С. П., Михайлов М. А., Крутиев С. В. Волноводный квазиэллиптический фильтр на каскаде гребневых синглетов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

V. N. Korzh, S. P. Bukin, M.A. Mikhailov, S. V. Krutiev
Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

WAVEGUIDE PSEUDOELLIPTIC FILTER BASED ON A CASCADE OF RIDGE SINGLETS

Annotation. This work presents the synthesis and electrodynamic analysis of a seventh-order waveguide bandpass filter with a quasi-elliptic response and a center frequency of 6.5 GHz. The developed device has four poles, two on each side of the passband. The filter is assembled as a cascade of singlets—rectangular ridges, each carrying its own resonance and transmission zero: rotated ridges shift the zeros above the passband, while transverse ones shift them below.
Keywords: waveguide filter, singlet, ridge resonator, transmission zero, pseudoelliptic response, coupling coefficient
For citation: Korzh V. N., Bukin S. P., Mikhailov M. A., Krutiev S. V. Waveguide pseudoelliptic filter based on a cascade of ridge singlets // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Сложность разработки современных СВЧ-систем определяется не только высокими требованиями к электрическим характеристикам приёмно-передающих трактов, но и ограничениями на их весогабаритные параметры. Волноводные фильтры применяют там, где нужны высокая передаваемая мощность, малые вносимые потери и полное экранирование, – в узлах радиолокационных станций, спутниковых платформ и наземных станций связи, где ограничения на массу и физические размеры особенно жёсткие. В таких условиях вопрос повышения селективности фильтра при сохранении компактности стоит особо остро.

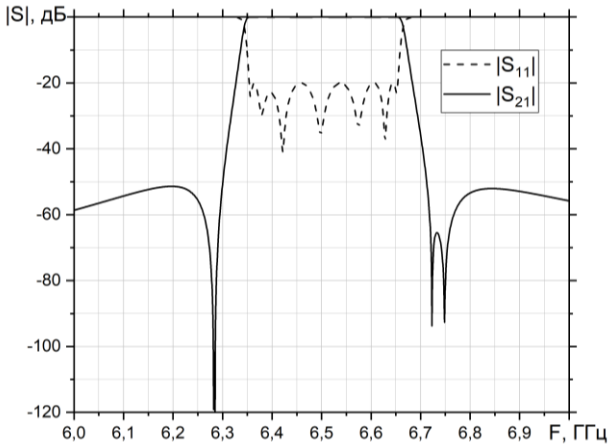
Избирательность фильтра обычно повышают, увеличивая его порядок. В волноводном исполнении это удлиняет конструкцию и увеличивает потери в полосе пропускания. Более эффективное решение – квазиэллиптическая характеристика: требуемая крутизна скатов обеспечивается конечными нулями передачи, а порядок фильтра оста-

ётся прежним. Такие нули обычно получают перекрёстными связями между несмежными резонаторами, однако каждый из них формируется группой резонаторов совместно, поэтому положения нулей взаимозависимы, а связь несмежных полостей нарушает продольную однородность конструкции.

Альтернативным решением может выступать применение элементарных резонансных ячеек – синглетов. Синглет образован одним резонатором и прямой связью источник – нагрузка, минующей этот резонатор. Два пути прохождения сигнала дают один резонанс и один нуль передачи на определённой частоте. Отстройка нуля от резонансной частоты определяется отношением связи с портами к обходной связи, а сторона полосы, с которой он расположится, – знаком обходной связи. Цель работы – синтезировать волноводный фильтр на каскаде таких структур с нулями передачи с каждой стороны полосы пропускания.

В работе рассматриваются синглеты двух типов – повёрнутые и поперечные. Оба образованы одним прямоугольным гребнем и различаются тем, как он поставлен в волноводе. Повёрнутый гребень уводит нуль передачи в верхнюю полосу заграждения, поперечный – в нижнюю. Геометрия гребня управляет связями почти раздельно. Связь с портами задают смещение у поперечного гребня и угол поворота у повёрнутого. Этой же связью задана ширина полосы пропускания. Прямую связь задаёт зазор между торцом гребня и стенкой волновода: от него зависят уровень заграждения и положение нуля пропускания. Резонансную частоту задаёт длина гребня, которая выбирается равной порядка половины длины волны в свободном пространстве.

Фильтр собран из четырёх синглетов, соединённых тремя полуволновыми отрезками однородного волновода. Такие отрезки сами становятся резонаторами, поэтому каскад из четырёх гребней даёт фильтр седьмого порядка с четырьмя нулями передачи. Крайние синглеты образованы поперечными смещёнными гребнями с Г-образными отводами, два средних – повёрнутыми гребнями с симметричными отводами. Сечение волновода 35 × 15 мм постоянно по всей длине конструкции. Полоса пропускания по уровню −3 дБ составила 6,34–6,67 ГГц при средней частоте 6,5 ГГц (см. рис.). В полосе видны семь резонансов – возбуждены все семь резонаторов, обратные потери во всей полосе не хуже 20 дБ. Скаты крутые: ниже полосы уровень передачи падает до −40 дБ на интервале около 40 МГц от её края и до −80 дБ на интервале около 50 МГц, выше полосы те же уровни достигаются на 30 и 50 МГц. Каскад гребневых синглетов в отрезке однородного волновода позволяет получить квазиэллиптическую характеристику, что в свою очередь повышает селективные свойства разрабатываемого фильтра. Предлагаемая структура проста в производстве, её можно изготовить методом фрезеровки из двух деталей, поэтому она представляет интерес как техническое решение.



Зависимость коэффициента передачи $|S_{21}|$ и отражения $|S_{11}|$ от частоты синтезированного фильтра

А. О. Ложников, Р. С. Нагорнов
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

СТОЙКОСТЬ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СЛУЧАЙНОЙ ВИБРАЦИИ

Аннотация. Рассмотрена проблема чувствительности кварцевых генераторов к механическим нагрузкам. Проведены экспериментальные исследования кварцевых генераторов с резонаторами различных конструкций на частоты от 9 до 50 МГц (срезы АТ, ВТ и ТД) и выданы рекомендации по увеличению стойкости к воздействиям механических нагрузок.
Ключевые слова*:* кварцевые генераторы, g-чувствительность, широкополосная случайная вибрация (ШСВ), срез АТ, срез ВТ, срез ТД.
Для цитирования*:* Ложников А. О., Нагорнов Р. С. Стойкость кварцевых генераторов к воздействию широкополосной случайной вибрации // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. O. Lozhnikov, R. S. Nagornov
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

RANDOM VIBRATION RESISTANCE OF QUARTZ OSCILLATORS

Annotation. The issue of quartz oscillator sensitivity to mechanical loads is addressed. Experimental studies were conducted on quartz oscillators featuring resonators of various designs at frequencies ranging from 9 to 50 MHz (AT, BT, and TD cuts), and recommendations are provided to enhance their resistance to mechanical loads.
Keywords: quartz oscillators, crystal resonators, g-sensitivity, random vibration, AT-cut, BT-cut, SC-cut.
For citation*:* Lozhnikov A. O., Nagornov R. S. Random vibration resistance of quartz oscillators // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В современных системах радиолокации, навигации и высокоскоростной связи критически важным фактором является сохранение спектральной чистоты сигналов опорных генераторов в условиях жестких механических воздействий. Динамические ускорения и вибрации приводят к росту фазовых шумов и возникновению паразитных спектральных составляющих. Физический механизм данного явления обусловлен нелинейными эффектами высших порядков: динамические деформации кристаллической решетки вызывают изменение эффективного модуля упругости пьезоэлемента, что влечет за собой сдвиг резонансной частоты. Основным количественным критерием, определяющим степень ухудшения спектральных характеристик прибора в условиях динамических нагрузок, является вектор чувствительности к ускорению. Все известные способы пассивной, двухрезонаторной или активной динамической компенсации увеличивают габариты, энергопотребление и существенно усложняют конструкцию приборов.

Целью исследования является экспериментальное выявление зависимости чувствительности кварцевых генераторов к механическим нагрузкам от конструктивных особенностей их пьезоэлементов и формирование рекомендаций по их выбору.

Для проведения данных исследований использовались два основных метода – переворот и измерение фазовых шумов при воздействии широкополосной случайной вибрации (ШСВ). Суть первого метода заключается в том, что при повороте генератора на 180 градусов вокруг горизонтальной оси ускорение свободного падения меняется от -1g до +1g, что дает разницу в 2g. Вычислить величину g-чувствительности генератора по испытываемой оси можно, поделив на 2 величину разности частот для двух положений генератора. Метод испытаний в режиме ШСВ характеризуется тем, что вибрационное воздействие представляет собой случайный процесс с непрерывным спектром, где параметры распределены по всему рабочему диапазону частот. Расчет компоненты виброчувствительности по измеряемой оси производился на основе зарегистрированного уровня фазовых шумов на конкретной частоте отстройки и пикового значения приложенного ускорения. Чувствительность к ускорению «Г» определяют путём измерения отдельных взаимно ортогональных компонент по трем осям как корень из суммы их квадратов. G-чувствительность (компонента) по одной из осей определяется через пиковое значение приложенного ускорения, частоту вибрации и уровень фазовых шумов на частоте вибрации.

Так уменьшение чувствительности к ускорению в 10 раз улучшает фазовые шумы на 20 дБ. Физическая сущность данной закономерности заключается в том, что генераторы с близкими номинальными частотами и одинаковыми коэффициентами чувствительности в условиях вибрации демонстрируют идентичные уровни фазовых шумов. При этом индуцированный вибрационный шум полностью маскирует собственный фазовый шум генераторов, измеренный в статическом режиме. В качестве объектов исследования были рассмотрены термостатированные кварцевые генераторы с резонаторами прямоугольной и круглой формы, а также термокомпенсированные и тактовые кварцевые генераторы в выводных и SMD корпусах. Измерения чувствительности тактовых и термокомпенсированных генераторов статическим методом переворота оказались невозможны из-за недостаточной их кратковременной стабильности. Также использование данного метода приводит к искажению реальной картины и при измерении термостатированных генераторов, так как при статических испытаниях нивелируются резонансные явления в конструкции.

В результате исследования получены следующие результаты. Наихудшую виброустойчивость $\Gamma=1{,}5\cdot10^{-9}$ демонстрирует высокочастотный генератор на 50 МГц на основе кварцевого резонатора ВТ-среза, работающего на 5 механической гармонике. Тестирование резонаторов ТД-среза показало, что стандартный резонатор с круглой линзовой пластиной диаметром 10 мм демонстрирует более высокую виброустойчивость по сравнению с прямоугольным линзовым пьезоэлементом размера 10х7 мм резонатора-термостата. Модуль g-чувствительности стандартной конструкции на частоте 1 кГц ниже на 20%, что указывает на лучшую сбалансированность и жесткость осесимметричной дисковой структуры и её узлов фиксации несмотря на конструктивный резонанс конструкции генератора целиком.

При воздействии вибрации на генератор с SMD резонатором на 25 МГц размером 2х1,6 мм по двум из трех осей не было обнаружено ухудшение фазовых шумов. Для определения значения компонент по данным осям спектральную плотность мощности вибрации приходилось увеличивать в 3 раза. В итоге получено значение для данного резонатора $\Gamma=0{,}44\cdot10^{-9}$, причем значение компоненты по оси X составило $0{,}04\cdot10^{-9}$!

В ходе работы отмечено, что уменьшение размеров корпуса снижает модуль вектора чувствительности благодаря уменьшению массы системы и росту её механической жесткости. Напротив, повышение частоты резонаторов в однотипных корпусах приводит к росту виброчувствительности пропорционально частоте, что связано с уменьшением толщины кварцевой пластины и её податливостью к деформациям.

Таким образом для проектирования перспективных высокостабильных генераторов, работающих в условиях жестких механических воздействий, необходимо отдавать приоритет миниатюрным корпусам, использовать резонаторы с круглыми пьезоэлементами линзовой формы и обеспечивать подбор точек крепления пьезоэлемента и конструкции держателя расчетно-экспериментальным путем.

Т. В. Ложникова[1], А. Г. Козлов[2]
[1]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[2]Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

РЕЗОНАТОРЫ ИЗ ЛАНГАСИТА НА ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Аннотация. Изготовление резонаторов из лантан-галлиевого силиката (лангасита) на объемных акустических волнах мало освещается в научной литературе. Отдельные авторы подробно рассматривают некоторые моменты технологии, в то время как полное описание технологии изготовления резонаторов из лангасита отсутствует. В работе представлена технология изготовления серийных пьезоэлектрических резонаторов на объемных акустических волнах из лангасита, предназначенных для устройств селекции частоты. Выявлены проблемные вопросы технологии, представлены варианты их решения. Проведен анализ температурных зависимостей ряда электрических параметров полученных резонаторов.
Ключевые слова*:* лангасит, технология изготовления резонаторов, температурно-частотная характеристика, динамическое сопротивление, динамическая емкость, статическая емкость, индуктивность, добротность.
Для цитирования*:* Ложникова Т. В., Козлов А. Г. Технология изготовления резонаторов из лангасита на объемных акустических волнах // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

T. V. Lozhnikova[1], A. G. Kozlov[2]
[1]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[2]Technical Omsk State University, Omsk, Russian Federation

RESONATORS FROM LANGASITE USING BULK ACOUSTIC WAVES

Annotation. The technology for manufacturing resonators from lanthanum gallium silicate (langasite) using bulk acoustic waves is poorly covered in the scientific literature. Some authors examine certain aspects of the technology in detail, while a complete description of the technology for manufacturing resonators from langasite is lacking. The paper presents the technology for manufacturing mass produced piezoelectric resonators based on bulk acoustic waves made from langasite, intended for frequency selection devices. The problematic issues of the technology are identified, and possible solutions are presented. An analysis was carried out of the temperature dependencies of a number of electrical parameters of the obtained resonators.
Keywords*:* langasite, resonator manufacturing technology, temperature frequency characteristic, dynamic resistance, dynamic capacitance, static capacitance, inductance, quality factor.
For citation*:* Lozhnikova T. V., Kozlov A. G. The technology for manufacturing resonators from langasite using bulk acoustic waves // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026..

Традиционно пьезоэлектрическим материалом для изготовления устройств на объемных акустических волнах служит монокристаллический кварц, сочетающий высокую добротность и температурную стабильность. Из-за невысокого коэффициента электромеханической связи данный материал мало пригоден для создания широкополос-

ных монолитных фильтров, ограничивает возможности перестройки частоты в устройствах генерации частоты. Поэтому проводится постоянный поиск новых материалов, приближающихся к кварцу по температурной стабильности, но имеющих больший коэффициент электромеханической связи. Одним из таких материалов, используемых для изготовления резонаторов на объемных акустических волнах, является лантан-галлиевый силикат (лангасит, $La_3Ga_5SiO_{14}$).

Технологию изготовления резонаторов можно разделить на несколько блоков: изготовление пьезоэлементов, изготовление резонаторов, оценка и контроль параметров резонаторов.

Наиболее трудоемким и критичным процессом, требующим учета особенностей материала, является изготовление пьезоэлементов, которое включает разделение заготовок, формирование контура кристаллического элемента, химическое травление, механическую полировку, снова химическое травление и механическую полировку, напыление защитного покрытия, травление кристаллических элементов до окончательной частоты, напыление электродов. Такая последовательность операций обусловлена отказом от щлифования кристаллических элементов из-за появления царапин и сколов и необходимостью механического удаления дефектов травления полировкой. Малая толщина рабочей области кристаллического элемента требует формирования упрочняющей структуры.

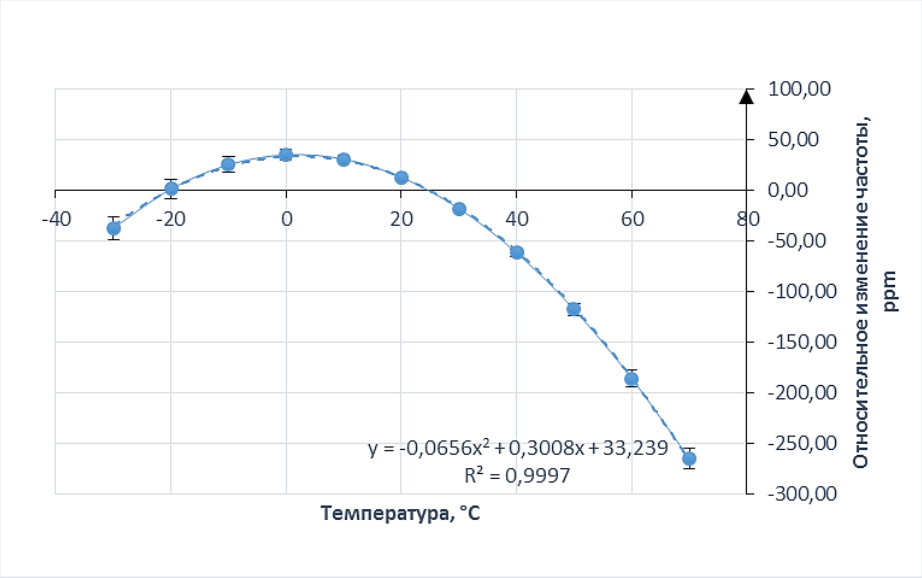
На этапе изготовления пьезоэлементов проблемными вопросами технологии являются: низкая скорость травления на промежуточных этапах травления, появление царапин в процессе полировки, невозможность удаления защитных и электродных покрытий без изменения толщины (частоты) кристаллического элемента. Для решения указанных проблем предложены растворы для травления лангаситовых кристаллических элементов на промежуточных этапах с более высокой скоростью, проведен подбор полирующего состава, позволяющий улучшить состояние поверхности кристаллического элемента, подобран раствор для удаления защитных и электродных покрытий, не изменяющий толщину (частоту) кристаллического элемента.

Изготовление резонаторов с пьезоэлементами из лангасита включает сборку и монтаж пьезоэлемента в кристаллодержатель, предварительную настройку резонаторов, отжиг, герметизацию, технологические испытания. Данные операции выполняются аналогично кварцевым резонаторам и достаточно хорошо отработаны. Оценка и контроль параметров лангаситовых резонаторов проводится в рамках отбраковочных, предъявительских и иных испытаний и также аналогичны кварцевым.

Для оценки параметров резонаторов, полученных по описанной технологии, были изготовлены резонаторы с пьезоэлементом из лангасита на частоту 70 МГц, с углом среза Yzb/+1°30'±2, работающие на толщинно-сдвиговых колебаниях, в металлостеклянных корпусах с выводами, предназначенными для монтажа в отверстия в количестве 39 штук. На данной выборке была проведена проверка изменения частоты, динамического сопротивления, индуктивности, статической и динамической емкости резонаторов в интервале рабочих температур от минус 30°С до 70°С, рассчитана добротность резонаторов. Полученные данные усреднены, рассчитано среднеквадратичное отклонение для всех перечисленных величин. Усредненная температурно-частотная характеристика лангаситовых резонаторов приведена на рисунке.

Температурно-частотную характеристику лангаситовых резонаторов можно аппроксимировать полиномом второго порядка. При этом экстремум температурно-частотной характеристики соответствует температуре 2,29 °С, что противоречит литературным данным. Также полученная температурно-частотная характеристика (парабола) имеет больший коэффициент крутизны, чем указано в литературе, что, вероятно, свидетельствует о значительном влиянии конструкции резонатора на параметры тем-

пературно-частотной характеристики. Для получения симметричной температурно-частотной характеристики и, следовательно, минимизации изменения частоты в исследуемом диапазоне температур, следует изменить угол среза кристаллических элементов в сторону меньших углов поворота, предположительно, использовать кристаллические элементы с углом среза 1°00’. Среднеквадратичное отклонение также зависит от температуры: максимально на нижних и верхних границах диапазона, минимально в диапазоне температур от 20 до 30 °С. Это может быть связано как с характеристикой материала пьезоэлемента, так и с технологическими факторами и конструкцией резонатора.



Усредненная температурно-частотная характеристика лангаситовых резонаторов

Динамическое сопротивление резонаторов увеличивается с ростом температуры линейно. Температурный коэффициент сопротивления составляет 7,5 х 10^{-4} °C^{-1}, следовательно, можно считать изменение сопротивления в интервале температур незначительным. Рост сопротивления с ростом температуры не характерен для диэлектриков, что позволяет предположить, что основной вклад в изменение динамического сопротивления вносят металлические части кристалложержателей. Дисперсия и среднеквадратичное отклонение динамического сопротивления уменьшаются с ростом температуры.

С ростом температуры наблюдается увеличение динамической емкости по линейному закону. Скорость изменения динамической емкости 8,79 х 10^{-4} °C^{-1}. Такое изменение динамической емкости можно считать незначительным. Дисперсия и среднеквадратичное отклонение динамической емкости остаются примерно постоянными во всем рассмотренном температурном диапазоне. Индуктивность и статическая емкость полученных резонаторов остаются постоянными во всем температурном интервале и составляют 0,9±0,1 мГн и 1,5±0,1 пФ соответственно.

Добротность резонаторов уменьшается с ростом температуры по линейному закону. Скорость изменения составляет 1,14 х 10^{-3} °C^{-1}. Добротность характеризует различного рода потери энергии, определяющие затухание колебаний. Добротность резонатора зависит от формы, размеров, крепления пьезоэлементов, качества обработки поверхности кристаллических элементов, качества электродов, давления остаточных газов внутри корпуса резонаторов. Характер изменения температуры свидетельствует о увеличении потерь энергии с увеличением температуры и, вероятно, связана с увеличением потерь в элементах крепления пьезоэлемента.

М. А. Михайлов, С. В. Крутиев, С. П. Букин, В. Н. Корж, Э. Р. Шаповалов
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ВОЛНОВОДНЫЙ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР НА ТРЕХ ТОНКИХ РЕЗОНАНСНЫХ ДИАФРАГМАХ

Аннотация. Рассмотрен волноводный полосно-пропускающий фильтр на трех тонких резонансных диафрагмах, связанных четвертьволновыми отрезками регулярного волновода WR-90. Выполнены электродинамический расчет и оптимизация геометрии. Диапазон анализа составляет 8–12 ГГц. В интервале 9,42–9,92 ГГц уровень коэффициента отражения S_{11} не превышает −22 дБ. На характеристике отражения наблюдаются три минимума. По обе стороны полосы пропускания наблюдаются глубокие минимумы коэффициента передачи S_{21}.
Ключевые слова: волноводный полосно-пропускающий фильтр; резонансные диафрагмы; кольцевой резонатор; щели связи; нули передачи; электродинамический расчет.
Для цитирования: Михайлов М. А., Крутиев С. В., Букин С. П., Корж В. Н., Шаповалов Э. Р. Волноводный полосно-пропускающий фильтр на трех тонких резонансных диафрагмах // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

M. A. Mikhailov, S. V. Krutiev, S. P. Bukin, V. N. Korzh, E. R. Shapovalov
Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

WAVEGUIDE BANDPASS FILTER BASED ON THREE THIN RESONANT DIAPHRAGMS

Annotation. A waveguide bandpass filter based on three thin resonant diaphragms coupled by quarter-wave sections of a uniform WR-90 waveguide is considered. Electromagnetic simulation and geometry optimization were performed over the 8–12 GHz frequency range. Within the 9,42–9,92 GHz interval, the return loss is at least 22 dB. The reflection response exhibits three minima. Deep minima of the transmission coefficient S_{21} are observed on both sides of the passband.
Keywords: waveguide bandpass filter; resonant diaphragms; ring resonator; coupling slots; transmission zeros; electromagnetic simulation.
For citation: Mikhailov M. A., Krutiev S. V., Bukin S. P., Korzh V. N., Shapovalov E. R. Waveguide bandpass filter based on three thin resonant diaphragms // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Современные приемопередающие тракты требуют высокой частотной избирательности при минимальных потерях и уменьшенных габаритах фильтрующих устройств. Для решения этой задачи исследована трехзвенная структура, в которой резонансные элементы интегрированы непосредственно в плоскость тонких металлических диафрагм. Фильтр выполнен в стандартном прямоугольном волноводе WR-90 с поперечным сечением 23×10 мм. Каждая диафрагма имеет толщину 1 мм и содержит круглую апертуру, внутренний кольцевой металлический резонатор и продольные щели связи.

Использование резонансных диафрагм позволяет формировать полосу пропускания и нули передачи без применения протяженных объемных резонаторов. Резонансные диафрагмы установлены в прямоугольном волноводе и связаны четвертьволновыми отрезками регулярного волновода. Схематическое представление исследуемого фильтра

приведено на рис. 1. В качестве параметров многопараметрической оптимизации рассматривались расстояния между соседними диафрагмами и размеры центральной секции. Результаты расчета представлены частотными зависимостями коэффициентов передачи и отражения.

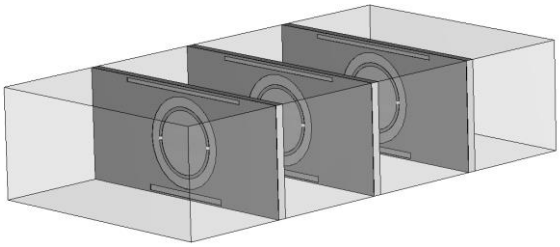


Рис. 1. *Схематическое изображение трехдиафрагменного волноводного фильтра*

Междиафрагменные расстояния выбирались близкими к четверти длины волны в волноводе. После электродинамического расчета и оптимизации они составили 10,55 и 10,35 мм. В ходе оптимизации скорректированы размеры апертуры и щелей связи центральной диафрагмы относительно крайних. Длина ее щелей составляет 13,4 мм, а длина щелей крайних диафрагм – 13,0 мм; ширина щелей составляет 0,35 мм.

Результирующая амплитудно-частотная характеристика фильтра приведена на рис. 2. Диапазон анализа составляет 8–12 ГГц. В согласованной части полосы пропускания, в интервале 9,42–9,92 ГГц, уровень S_{11} не превышает −22 дБ. На характеристике S_{11} наблюдаются три выраженных минимума; наиболее глубокий находится ниже −50 дБ. Указанный интервал не задает границы полосы по уровню S_{21}. Уровень −22 дБ характеризует согласование внутри указанного интервала, а не глубину отдельных минимумов отражения.

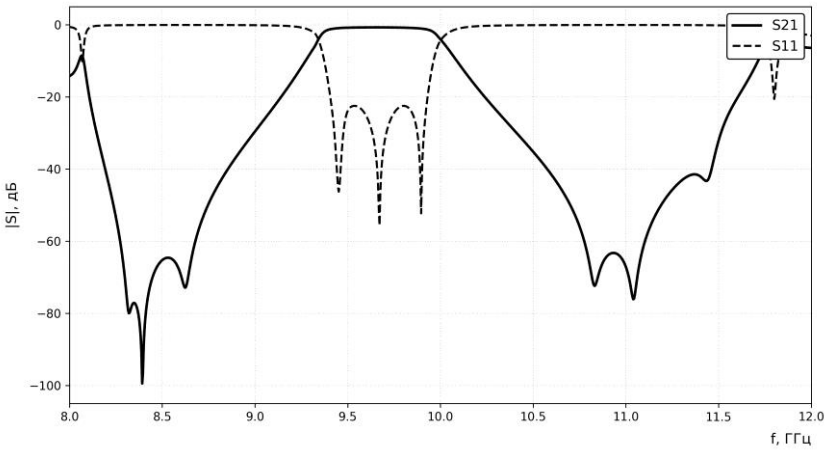


Рис. 2. *Амплитудно-частотная характеристика фильтра: сплошная линия – S_{21}, пунктирная линия – S_{11}*

По обе стороны полосы пропускания наблюдаются глубокие минимумы коэффициента передачи S_{21}. Внеполосная характеристика немонотонна: между глубокими провалами имеются участки с более высоким уровнем передачи. Глубина локальных минимумов не характеризует подавление во всей внеполосной области. Полученная характеристика сочетает низкие вносимые потери с высокой крутизной переходных областей. Общая продольная длина фильтрующей секции составляет менее 25 мм.

Таким образом, фильтр на трех металлических диафрагмах формирует квазиэллиптическую амплитудно-частотную характеристику с выраженными нулями передачи. Их положение регулируется геометрией апертур диафрагм, а согласование в рабочей полосе – размерами резонансных элементов и междиафрагменными расстояниями, реализующими четвертьволновую волноводную связь.

А. А. Савченко, А. Г. Козлов
Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРАЛЬНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ФАЛЬСИФИКАТА

Аннотация. Установлена взаимосвязь между электрическими и топологическими характеристиками интегральных стабилизаторов напряжения. Полученные результаты позволяют разработать методику экспресс-тестирования интегральных стабилизаторов напряжения для выявления фальсификата.
Ключевые слова*:* интегральный стабилизатор напряжения, LM317, LM337, фальсификат.
Для цитирования*:* Савченко А. А., Козлов А. Г. Исследование характеристик интегральных стабилизаторов напряжения для выявления фальсификата // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. A. Savchenko, A. G. Kozlov
Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF INTEGRATED VOLTAGE REGULATOR CHARACTERISTICS FOR COUNTERFEIT DETECTION

Annotation. A correlation between the electrical and topological characteristics of integrated voltage regulators has been established. The results obtained enable the development of an express testing technique for integrated voltage regulators to detect counterfeit products
Keywords*:* integrated voltage regulator, LM317, LM337, counterfeit.
For citation*:* Savchenko A. A., Kozlov A. G. Investigation of integrated voltage regulator characteristics for counterfeit detection // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Для обеспечения стабильности рабочих режимов ряда узлов радиоэлектронной аппаратуры применяются линейные интегральные стабилизаторы типа LM317 и LM337. Пределы изменения электрических характеристик стабилизаторов в процессе эксплуатации не должны превышать пределы, указанные в технической документации. Одной из острых проблем обеспечения стабильности рабочих характеристик узлов с применением интегральных стабилизаторов является их фальсификация.

Экспериментально установлено, что экспресс-измерение основных электрических характеристик интегральных стабилизаторов, таких как: соответствие выходного напряжения расчётному, минимальный и максимальный токи нагрузки, устойчивость к короткому замыканию, а также падение напряжения на интегральном стабилизаторе позволяют обнаружить только грубые образцы сфальсифицированной продукции.

Наибольшую сложность представляет обнаружение фальсификата с уменьшенной площадью кристаллов при сохранении технологического процесса производства. Такие сфальсифицированные стабилизаторы напряжения успешно проходят экспресс-тестирование основных электрических характеристик, но не обеспечивают надежность при длительной эксплуатации.

Сравнительное исследование микросхем LM317 и LM337 различных производителей выявило корреляцию между током управляющего электрода стабилизатора и площадью

кристалла. В фирменных стабилизаторах LM317 ток управляющего электрода лежит в диапазоне от 47 до 60 мкА во всём диапазоне токов нагрузки, а в сфальсифицированных с уменьшенной площадью кристалла – от 30 до 35 мкА. В фирменных стабилизаторах LM337 ток управляющего электрода лежит в диапазоне от 50 до 62 мкА во всём диапазоне токов нагрузки, а в сфальсифицированных – от 79 до 82. Таким образом, при уменьшении площади кристалла микросхем LM317 ток управляющего электрода преимущественно падает, а при уменьшении площади кристалла микросхем LM337 – преимущественно растёт. Дополнительное исследование тока управляющего электрода может служить маркером микросхем с уменьшенной площадью кристалла. Для однозначного подтверждения фальсификата необходимо провести выборочное исследование топологии кристалла (см. рис.).

Соотношение площадей кристалла и фланца интегральных стабилизаторов напряжения в корпусе TO-220

Кристалл фирменной микросхемы LM317 (первый образец слева) имеет площадь 4,56 мм^2, а площадь транзисторов выходного каскада – 1,38 мм^2. Кристалл фирменной микросхемы LM337 (второй образец слева) имеет площадь 6,20 мм^2, а площадь транзисторов выходного каскад – 2,58 мм^2. Кристалл фальсифицированной микросхемы LM317 (третий образец слева) имеет площадь 1,35 мм^2, а площадь транзисторов выходного каскада – 0,2 мм^2. Кристалл фальсифицированной микросхемы LM337 (четвёртый образец слева) имеет площадь 2,72мм^2, а площадь транзисторов выходного каскада 0,91 мм^2.

Образец фальсифицированной микросхемы LM317 был выявлен на этапе измерения основных электрических характеристик. Образец не прошёл испытания и является грубым фальсификатом. Образец фальсифицированной микросхемы LM337 был выявлен по результатам измерения тока управляющего электрода и дополнительно подтверждён по результатам исследования топологии кристалла. При этом образец полностью прошёл экспресс-измерение основных электрических характеристик.

Полученные результаты позволяют разработать методику экспресс-определения сфальсифицированных микросхем интегральных стабилизаторов типа LM317 и LM337 в корпусе TO-220.

Область применения: линейные стабилизаторы напряжения и тока на основе микросхем интегральных стабилизаторов напряжения LM317 и LM337 в корпусе TO-220.

С. А. Тарасенко, С. В. Крутиев
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КВАЗИЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ ФИЛЬТРОВ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Аннотация. Представлены результаты разработки квазиэллиптического волноводного полосно-пропускающего фильтра третьего порядка на диэлектрических резонаторах. Рассмотрен подход к формированию конечных нулей передачи посредством выбора конфигурации отдельных однорезонаторных секций. Электродинамическое моделирование подтвердило возможность реализации требуемой частотной характеристики в линейной структуре стандартного прямоугольного волновода WR137.
Ключевые слова: полосно-пропускающий фильтр, прямоугольный волновод, диэлектрический резонатор, квазиэллиптическая характеристика, нуль передачи, электродинамическое моделирование.
Для цитирования: Тарасенко С. А., Крутиев С. В. Электродинамический анализ квазиэллиптических волноводных фильтров с диэлектрическими резонаторами // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : сборник тезисов докладов IV Международной научной конференции (Омск, 6–8 октября 2026 г.). Омск, 2026.

S. A. Tarasenko, S. V. Krutiev
Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

ELECTRODYNAMIC ANALYSIS OF QUASI-ELLIPTIC WAVEGUIDE FILTERS WITH DIELECTRIC RESONATORS

Abstract. The results of the development of a third-order quasi-elliptic waveguide band-pass filter with dielectric resonators are presented. An approach to the formation of finite transmission zeros by selecting the configuration of individual single-resonator sections is considered. Electromagnetic simulation confirmed the possibility of obtaining the required frequency response in an in-line standard WR137 rectangular waveguide structure.
Keywords: band-pass filter, rectangular waveguide, dielectric resonator, quasi-elliptic response, transmission zero, electrodynamic simulation.
For citation*:* Tarasenko S. A., Krutiev S. V. Electrodynamic analysis of quasi-elliptic waveguide filters with dielectric resonators // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Одним из способов повышения селективности полосно-пропускающих фильтров является формирование конечных нулей передачи, расположенных вблизи полосы пропускания. По сравнению с простым чебышевским откликом такая характеристика обеспечивает более крутые скаты и лучше подавляет соседние каналы. При этом обычное увеличение числа резонаторов ухудшает массогабаритные показатели, поэтому в современных волноводных фильтрах стремятся использовать дополнительные пути передачи электромагнитной энергии, перекрестные и частотно-зависимые связи и межмодовое взаимодействие. Для построения квазиэллиптических волноводных фильтров интерес представляет применение диэлектрических резонаторов, поскольку высокая диэлектрическая проницаемость материала позволяет уменьшить их размеры, малые

диэлектрические потери обеспечивают высокую добротность, а температурная стабильность способствует сохранению резонансной частоты. Введение диэлектрика сопровождается дополнительными потерями, однако в рассматриваемом диапазоне частот они могут быть существенно снижены за счёт применения низкопотерной микроволновой керамики с относительной диэлектрической проницаемостью около 30.

При проектировании фильтра третьего порядка и его дальнейшей оптимизации был выполнен электродинамический анализ отдельных однорезонаторных секций. В результате были выявлены параметры, существенно влияющие на положение резонансных полюсов и конечных нулей передачи. Далее исследованные секции последовательно каскадировались, образуя трехрезонаторную структуру.

Центральная секция, представленная на рис. 1, реализована в виде смещённого относительно оси волновода диэлектрического резонатора, расположенного между двумя индуктивными диафрагмами. По результатам электродинамического моделирования в её характеристике формируется резонансный полюс в области 5,58 ГГц и конечный нуль передачи ниже него, в области 5,35 ГГц.

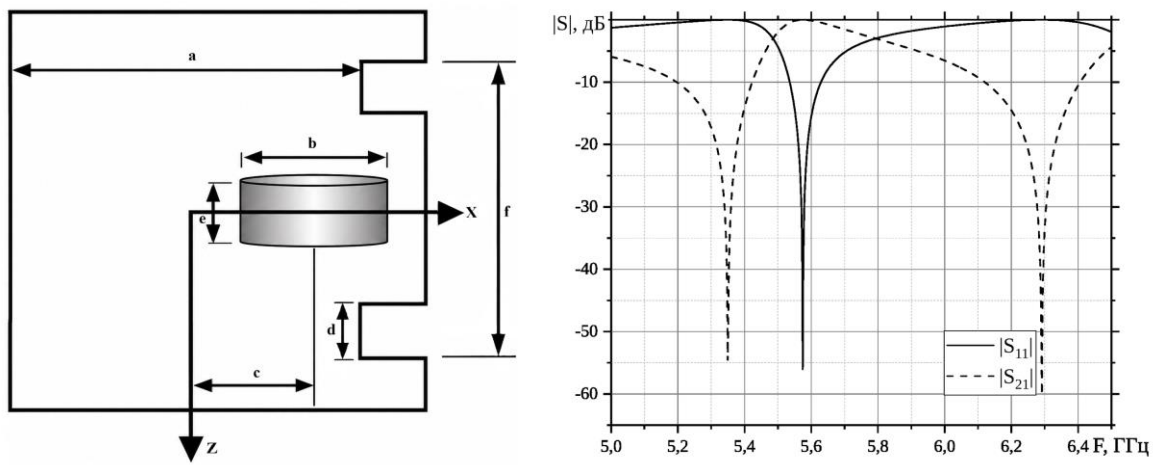


***Рис. 1**. Центральная однорезонаторная секция фильтра с основными геометрическими размерами и ее амплитудно-частотная характеристика*

Проектирование фильтра выполнялось непосредственно в стандартном прямоугольном волноводе WR137. Исходная топология трехрезонаторной структуры, использованная для последующей параметрической оптимизации, представлена слева на рис. 2.

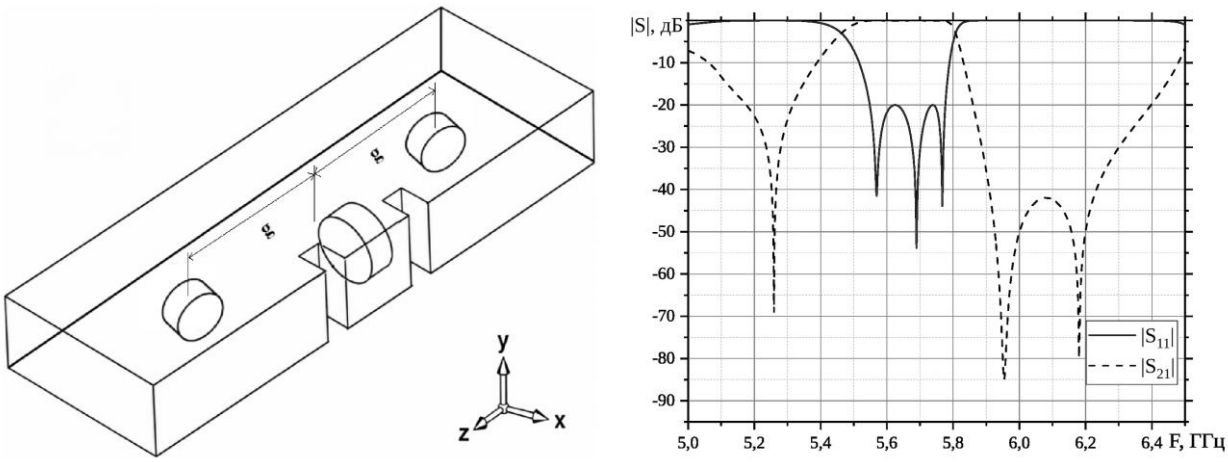


***Рис. 2**. Исходная топология фильтра третьего порядка и амплитудно-частотная характеристика оптимизированной конструкции*

Связь между отдельными однорезонаторными секциями осуществляется посредством отрезков волновода длиной g, выполняющих функцию инверторов импеданса. Их начальные значения выбирались исходя из четверти направляемой длины волны, после чего уточнялись в процессе параметрической настройки.

Рассчитанная амплитудно-частотная характеристика оптимизированной конструкции приведена справа на рис. 2. Относительная ширина полосы пропускания фильтра – 4,2 %, центральная частота составляет 5,66 ГГц. Вне полосы пропускания формируются три конечных нуля передачи: один расположен ниже полосы, два – выше неё. Потери в полосе не превышают 0,1 дБ.

Заключение: Выполненное исследование подтвердило возможность реализации квазиэллиптических характеристик в линейной волноводной структуре с диэлектрическими резонаторами, имеющими относительную диэлектрическую проницаемость около 30. Рассмотренный подход обеспечивает возможность управления положением конечных нулей передачи за счёт изменения конфигурации отдельных секций фильтра.

А. И. Тюменцев, А. А. Тюменцева, Т. С. Тимошенко, А. Н. Яковлев
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР НА КОАКСИАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРАХ

Аннотация. Рассмотрена возможность реализации полосового фильтра на коаксиальных резонаторах в объеме LTCC подложки. Проведено электромагнитное моделирование, изготовлены макеты и проведены измерения интегрального фильтра на коаксиальных резонаторах. Изготовленный фильтр с центральной частотой 1300 МГц, полосой пропускания 277 МГц и вносимыми потерями в полосе пропускания 2,2 дБ имеет затухание в полосе задерживания не менее 50 дБ.
Ключевые слова: Полосовой фильтр, коаксиальный резонатор, LTCC керамика.
Для цитирования: Тюменцев А. И., Тюменцева А. А., Тимошенко Т. С., Яковлев А. Н. Интегральный фильтр на коаксиальных резонаторах // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. I. Tyumentsev, A. A. Tyumentseva, T. S. Timoshenko, A. N. Yakovlev
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

INTEGRATED FILTERS ON COAXIAL RESONATORS

Annotation. The paper examines the possibility of implementing a bandpass filter using coaxial resonators in the volume of an LTCC substrate. Electromagnetic modeling was carried out, prototypes were manufactured, and measurements of an integrated filter based on coaxial resonators were performed. The manufactured filter, with a central frequency of 1300 MHz, a passband of 277 MHz, and insertion losses in the passband of 2.2 dB, has an attenuation in the stopband of at least 50 dB.
Keywords: Band-pass filter, coaxial resonator, LTCC ceramic.
For citation: Tyumentsev A. I., Tyumentseva A. A., Timoshenko T. S., Yakovlev A. N. Integrated filters on coaxial resonators // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Полосовые фильтры на коаксиальных резонаторах находят широкое применение в различных радиотехнических устройствах. Общая теория фильтров достаточно полно освещена в литературе. В системах широкополосной связи широкое применение нашли конструкции фильтров на коаксиальных резонаторах. Такие фильтры имеют достаточно хорошо отработанную конструкцию, представляющую из себя набор дискретных резонаторов и конденсаторов, смонтированных на диэлектрической подложке. В настоящее время продолжается совершенствование конструкций фильтров на коаксиальных резонаторах с точки зрения улучшения технологичности их изготовления. Таким образом, целью данной работы является разработка конструкции интегрального фильтра на коаксиальных резонаторах.

В настоящей работе рассмотрена возможность интеграции коаксиального резонатора в объем диэлектрической подложки. Для реализации конструкции фильтра на коаксиальных резонаторах в интегральном виде можно использовать LTCC технологию. В

качестве примера использования такого подхода, проведем расчет, моделирование и изготовление фильтра на 11 резонаторах с емкостной связью, с центральной частотой 1300 МГц и полосой пропускания 270 МГц.

Расчет геометрических размеров коаксиальных резонаторов для данного фильтра можно провести по известным методикам, широко изложенным в литературе с тем уточнением, что внутренний проводник резонатора образован печатными проводниками прямоугольной формы, расположенными в центре диэлектрической подложки, соединёнными между собой переходными отверстиями, а внешний проводник образован за счет проводящих слоев, расположенных на внешних поверхностях первого и последнего диэлектрических слоев, соединенных друг с другом переходными отверстиями, расположенными вдоль длинных сторон резонатора и со стороны первого конца внутреннего проводника. В данной конструкции конденсаторы связи можно заменить интегральными конденсаторами, что позволяет представить фильтр в виде монолитной структуры и избежать трудоемкий процесс настройки фильтра.

Внешний вид 3D модели фильтра приведен на рис. 1.

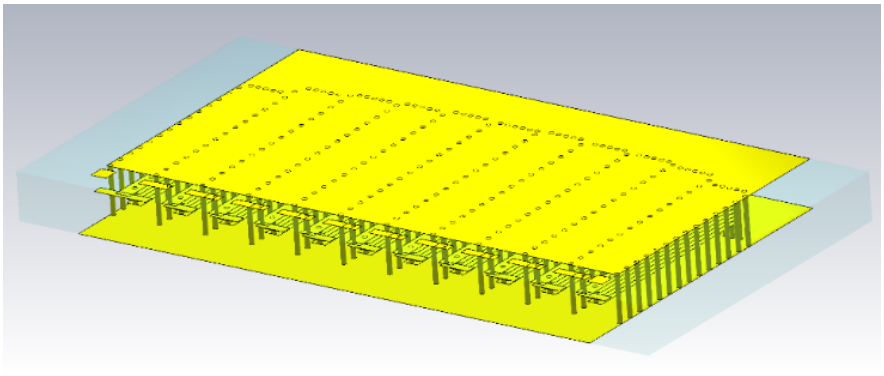


Рис. 1. *Внешний вид 3D модели фильтра*

Конструктивно фильтр выполнен в 12 слоях низкотемпературной керамики СКМ с диэлектрической проницаемостью 7,2. Габаритные размеры фильтра составили 35x22x3 мм. Подстройка разработанного фильтра проходила в несколько итераций электромагнитного моделирования. По результатам моделирования был изготовлен макет фильтра. Результаты измерения амплитудно-частотной характеристики фильтра приведены на рис. 2.

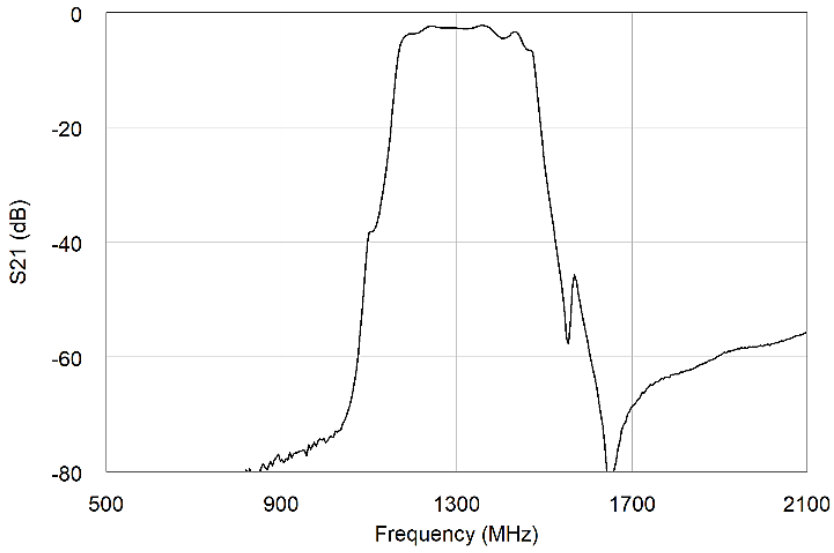


Рис. 2. *Амплитудно-частотная характеристика фильтра*

Как видно из результатов измерения центральная частота фильтра составила 1300 МГц, полоса пропускания 277 МГц, вносимые потери в полосе пропускания 2,2 дБ, затухание в полосе задерживания не менее 50 дБ.

В работе впервые показана возможность реализации полосового фильтра на коаксиальных резонаторах, выполненного на основе LTCC технологии. Показан пример реализации такого фильтра с центральной частотой 1300 МГц и относительной полосой пропускания менее 277 МГц. За счет высокой повторяемости параметров интегральных фильтров, а также отработанной технологии с высоким процентом выхода годных и отсутствия подстройки, интегральные фильтры на коаксиальных резонаторах позволят не только уменьшить массогабаритные характеристики радиопередающих и радиоприемных устройств, но и снизить стоимость готовых изделий.

А. А. Тюменцева[1,2], А. И. Тюменцев[1], Т. С. Тимошенко[1], А. Н. Яковлев[1]
[1]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[2]Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УКОРАЧИВАЮЩИХ КОНДЕНСАТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ SIW-РЕЗОНАТОРОВ

Аннотация. Проведено исследование влияния укорачивающих конденсаторов на частотные характеристики, добротность резонаторов, выполненных по SIW-технологии. Приведены графики полученных частотных зависимостей. Данная информация позволит сократить время разработки СВЧ-фильтров на основе резонаторов, выполненных по SIW-технологии.
Ключевые слова: объемный резонатор, укорачивающий конденсатор, емкостно-нагруженный конденсатор, ЕНОР, SIW-резонатор, SIW-фильтр, LTCC-фильтр.
Для цитирования: Тюменцева А. А., Тюменцев А. И., Тимошенко Т. С., Яковлев А. Н. Исследование влияния укорачивающих конденсаторов на параметры SIW-резонаторов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. A. Tyumentseva[1,2], A. I. Tyumentsev[1], T. S. Timoshenko[1], A. N. Yakovlev[1]
[1]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

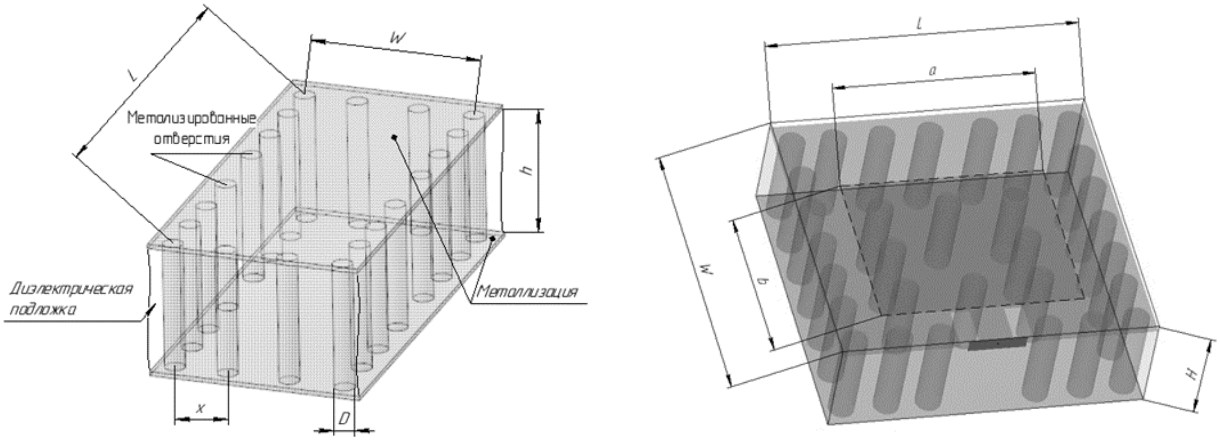
INVESTIGATION INFLUENCY CAPACITIVE-LOAD ON CHARACTERISTIC SIW-RESONATORS

Annotation. A study was conducted to investigate the effect of shorting capacitors on the frequency characteristics and quality factor of resonators made using SIW technology. The graphs of the obtained frequency dependencies are presented. This information will help reduce the time required to develop microwave filters based on resonators made using SIW technology.
Keywords: bulk resonator, shorting capacitor, capacitively loaded capacitor, ENOR, SIW resonator, SIW filter, LTCC filter.
For citation: Tyumentseva A. A., Tyumentsev A. I., Timoshenko T. S., Yakovlev A. N. Study of the effect of shorting capacitors on the parameters of SIW resonators // Radiophysics, Photonics and Research of the Properties of Matter : Abstracts of Reports of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Качество систем связи зависит от характеристик применяемых устройств частотной селекции. Поскольку в последнее время идет тенденция к миниатюризации, то на замену микрополосковым и дискретным фильтрам в СВЧ-диапазоне приходят LTCC-фильтры. Большое распространение получают фильтры на объемных резонаторах, выполненные по SIW-технологии (SIW – интегрированные в подложку волноводы), которые позволяют реализовать узкополосные фильтры с низкими вносимыми потерями в малогабаритном исполнении.

Конструктивно SIW-фильтры на объемных резонаторах представляют собой емкостно-нагруженные объёмные резонаторы (ЕНОР), выполненные по технологии волноводов, интегрированных в подложку, и соединенные емкостной или индуктивной связью.

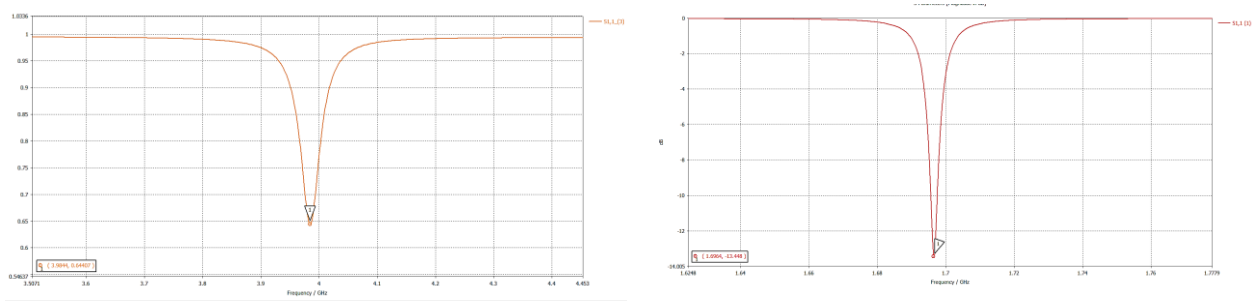
Для уменьшения высоты резонатора и сокращения габаритных размеров в конструкциях таких фильтров применяют укорачивающие конденсаторы. На рис. 1 приведена конструкция объемного SIW-фильтра на двух объемных резонаторах. Здесь видно, что укорачивающий конденсатор представляет собой зазор между пластиной на концах резонансных штырей и металлизированной крышкой резонатора. Ранее в работах уже рассматривались исследования фильтров на объемных резонаторах, однако влияние укорачивающего конденсатора на параметры объемного SIW-резонатора остается открытым вопросом.



а *б*

***Рис. 1**. Внешний вид объемного SIW-резонатора (а), внешний вид объемного SIW-резонатора с емкостной нагрузкой (б)*

В работе рассмотрены объемный SIW-резонатор и объемный SIW-резонатор с емкостной нагрузкой, выполненные в 20 слоях керамики типа СКМ, толщиной листа 150 мкм, размеры резонаторов составляют 20*20*3 мм.



а *б*

***Рис. 2**. Графики частотной зависимости для объемного SIW-резонатора (а) и объемного SIW-резонатора с емкостной нагрузкой (б)*

Из полученных графиков электромагнитного моделирования видим, что центральная частота объемного SIW-резонатора составляет 3,9 ГГц, а частота объемного SIW-резонатора с емкостной нагрузкой – 1,7 ГГц. Резонаторы, выполненные по SIW-технологии, обладают большой собственной добротностью, которая определяется электродинамической структурой резонатора (распределением электрического и магнитного полей в резонаторе), а также потерями в проводниках и диэлектрике, из которых выполнен резонатор. Для определения добротности было проведено электродинамическое моделирование. Было выявлено, что при изменении таких параметров, как высота, ширина, длина резонаторов и диэлектрическая проницаемость материала добротность объемного резонатора меняется в диапазоне от 503 до 508 ед., в то время, как добротность объемного резонатора с емкостной нагрузкой колеблется от 388 до 396 ед. При этом наибольшее влияние на изменение добротности оказывает диэлектрическая проницаемость материала.

А. Е. Уразбеков, П. Е. Троян, Ю. В. Сахаров
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Томск, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕМРИСТОРОВ СО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ НА ОСНОВЕ ОСТРОВКОВЫХ ПЛЕНОК АЛЮМИНИЯ

Аннотация. Предложена альтернативная структура тонкопленочного мемристора со вспомогательным электродом на основе нижнего островкового слоя алюминия, исключающая сложную прецизионную литографию. Формирование проводящих наноканалов обеспечивается локальными электрофизическими процессами при подаче переменного напряжения частотой от 100 кГц. Метод позволяет селективно модифицировать верхний электрод толщиной 30–60 нм, обеспечивая стабильное резистивное переключение.
Ключевые слова: мемристор, островковые пленки, филамент, оксид титана.
Для цитирования*:* Уразбеков А. Е., Троян П. Е., Сахаров Ю. В. Особенности формирования мемристоров со вспомогательным электродом на основе островковых пленок алюминия // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. E. Urazbekov, P. E. Troyan, Y. V. Sakharov
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

SPECIFICS OF THE FORMATION OF MEMRISTORS WITH AN AUXILIARY ELECTRODE BASED ON ALUMINUM ISLAND FILMS

Annotation. An alternative structure for a thin-film memristor featuring an auxiliary electrode based on a bottom aluminum island layer is proposed, eliminating the need for complex precision lithography. The formation of conductive nanochannels is driven by local electrophysical processes upon the application of an alternating voltage at frequencies of 100 kHz and above. This method enables the selective modification of the top electrode (30–60 nm thick), ensuring stable resistive switching.
Keywords*:* memristor, island films, filament, titanium oxide.
For citation*:* Urazbekov A. E., Troyan P. E., Sakharov Y. V. Specifics of the formation of memristors with an auxiliary electrode based on aluminum island films // Radiophysics, Photonics and Research of the Properties of Matter : Abstracts of Reports of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В качестве перспективной альтернативы известным филаментарным мемристорам, требующим сложного прецизионного формирования каналов проводимости в процессе высоковольтной электроформовки, предложена структура на основе нижнего островкового слоя, тонкого диэлектрического (резистивного) слоя и повторяющего его рельеф верхнего металлического электрода. Разработанный способ решает проблему прецизионной литографии и жестких условий формовки за счет локальных электрофизических процессов.

На подложке формируют нижний островковый алюминиевый электрод, после чего магнетронным осаждением наносят диэлектрический слой, вспомогательный электрод и верхний электрод толщиной 30–60 нм (рис. 1). Для создания управляемых проводящих наноканалов (филаментов) подают переменное напряжение (от 100 кГц). Из-за малого

радиуса кривизны микровыступов электрическое поле концентрируется на их вершинах (рис. 2), вызывая критическую плотность тока и адиабатический джоулев нагрев. В результате локальной электромиграции происходит селективная модификация материала с образованием стабильных сквозных наноканалов проводимости на вершинах выступов. В дальнейшем этот вспомогательный электрод служит матрицей для упорядоченного роста массива филаментов.

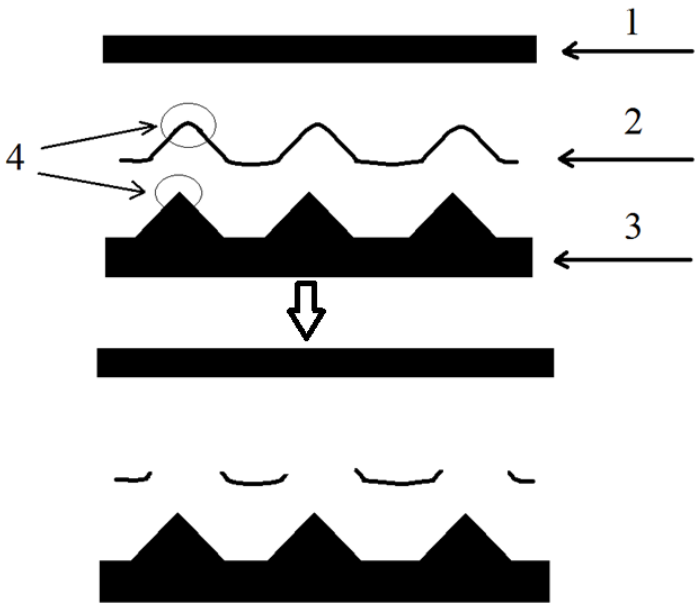


Рис. 1. *Схема структуры: 1 – верхний электрод; 2 – вспомогательный электрод; 3 – нижний островковый электрод; 4 – участки с повышенной напряженностью электрического поля*

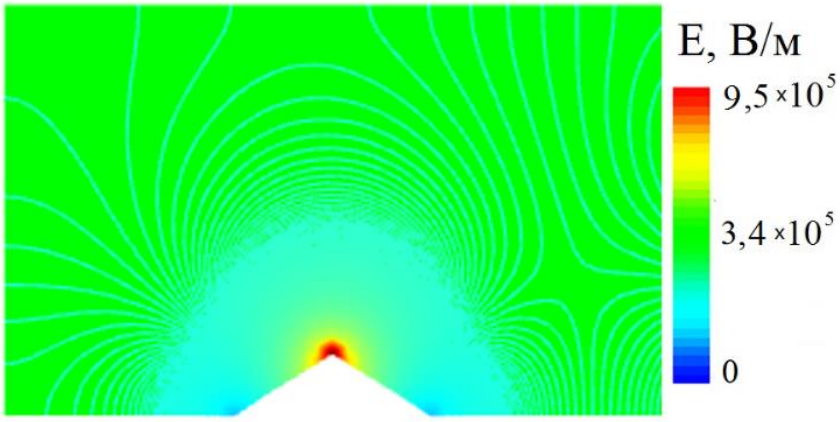


Рис. 2. *Распределение напряженности электрического поля возле выступов*

Необходимо подчеркнуть, что недостатком данного конструктивно-технологического решения является большая толщина диэлектрического слоя мемристорных структур. Но вместе с тем, данное решение позволяет расширить диапазон рабочих напряжений резистивного переключения, а также существенно повышает стабильность работы структуры

Работа была выполнена командой научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FEWM 2024-0004.

Х. Д. Фам
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Российская Федерация

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ-УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ КЛАССА F НА ЧАСТОТЕ 2,4 ГГц НА ОСНОВЕ GaN-ТРАНЗИСТОРА

Аннотация. Разработан высокоэффективный усилитель мощности класса F на частоте 2,4 ГГц. Конструкция основана на технологии *GaN HEMT* и цепях гармонического согласования. Режим класса F обеспечен четвертьволновыми микрополосковыми шлейфами в выходной согласующей цепи, формирующими требуемые импедансы на второй и третьей гармониках. По результатам моделирования достигнуты насыщенная выходная мощность 40,3 дБм, PAE 73,6 %, стоковый КПД 75 % и коэффициент усиления 12,3 дБ. Полученные характеристики позволяют применять усилитель в качестве базового модуля киловаттных передатчиков радиолокационных систем.
***Ключевые слова**:* усилитель мощности, класс F, GaN HEMT, КПД.
***Для цитирования**:* Фам Х. Д. Проектирование СВЧ-усилителя мощности класса F на частоте 2,4 ГГц на основе GaN-транзистора // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

H. D. Pham
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Санкт-Петербург, Российская Федерация

DESIGN OF A CLASS F POWER AMPLIFIER BASED ON GAN HEMT

Annotation. A high-efficiency Class-F power amplifier is designed at 2,4 GHz using GaN HEMT technology and harmonic impedance control networks. Quarter-wave microstrip stubs in the output network establish the required second- and third-harmonic terminations, enabling Class-F operation. Simulation results show output power of 40.3 dBm, PAE of 73,6%, drain efficiency of 75%, and gain of 12,3 dB. These results demonstrate the suitability of the proposed amplifier as a building block for kilowatt radar amplication.
***Keywords**:* power amplifier, class F, GaN HEMT, efficiency.
***For citation**:* Pham H. D. Design of a class F Power Amplifier based on GaN HEMT // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter: Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Эффективность современных передающих устройств в значительной степени определяется энергетическими характеристиками усилителей мощности. Одним из перспективных режимов работы усилителей, позволяющих повысить энергетическую эффективность, является режим класса F. Принцип его работы основан на формировании требуемых гармонических составляющих напряжения и тока на выходе активного прибора. За счёт соответствующего управления гармониками уменьшается взаимное перекрытие форм напряжения и тока, что способствует снижению потерь мощности и повышению коэффициента полезного действия усилителя. В идеализированном случае теоретическое значение коэффициента полезного действия усилителя класса F может приближаться к предельному значению. Однако в реальных СВЧ-устройствах достижение высокой энергетической эффективности ограничивается паразитными параметрами

транзистора, потерями в пассивных компонентах и ограниченным числом гармонических составляющих, которыми возможно эффективно управлять.

Особый интерес представляет применение транзисторов на основе нитрида галлия, обладающих высокой пробивной напряжённостью, высокой плотностью мощности и хорошими высокочастотными характеристиками. Использование таких транзисторов в сочетании с гармонической настройкой согласующих цепей позволяет создавать мощные и высокоэффективные усилители в диапазоне сверхвысоких частот. Ряд опубликованных исследований демонстрирует возможность получения высокой энергетической эффективности усилителей класса F на частоте 2,4 гигагерца. В частности, были разработаны усилители с гармоническим управлением, обеспечивающие высокие значения коэффициента полезного действия. Полученные результаты подтверждают перспективность применения транзисторов на основе нитрида галлия для построения высокоэффективных усилителей мощности в данном частотном диапазоне.

Вместе с тем достижение высокой эффективности в режиме максимальной выходной мощности не гарантирует сохранения энергетических характеристик при уменьшении уровня выходного сигнала. Для передающих устройств практический интерес представляет обеспечение высокой эффективности не только вблизи режима насыщения, но и при снижении выходной мощности относительно её максимального значения. В связи с этим исследование характеристик усилителя при различных уровнях выходной мощности является важной задачей при разработке современных высокоэффективных усилителей мощности.

В настоящей работе рассматривается проектирование усилителя мощности класса F на частоте 2,4 гигагерца на основе транзистора из нитрида галлия. Основное внимание уделяется разработке входной и выходной согласующих цепей, а также формированию требуемых импедансов на основной и гармонических частотах. Разработанный усилитель исследуется с точки зрения выходной мощности, коэффициента усиления и энергетической эффективности. Отдельно анализируется изменение энергетических характеристик при снижении выходной мощности относительно максимального уровня. Полученные результаты позволяют оценить эффективность разработанного решения и определить влияние гармонической настройки на характеристики усилителя в различных режимах работы.

На рис. 1 представлена общая структурная схема усилителя мощности класса F, которая представляет собой пять основных функциональных блоков: входную согласующую цепь, нитрид галлия транзистор CGH40010F, цепь гармонической настройки, выходную согласующую цепь и цепь постоянного смещения. Для обеспечения безусловной устойчивости усилителя во всём рабочем диапазоне частот в цепь управления затвором включена дополнительная стабилизирующая цепь.

Усилитель мощности разработан на подложке Rogers RO4350B. Благодаря низким диэлектрическим потерям и стабильным высокочастотным характеристикам данный материал подходит для разработки СВЧ-устройств, работающих в диапазонах L и S.

Разработанный усилитель мощности класса F исследуется с использованием программного комплекса Keysight Advanced Design System. Для определения выходной мощности, коэффициента усиления и энергетической эффективности выполняется анализ установившегося гармонического баланса при больших уровнях сигнала. Результаты моделирования усилителя мощности класса F представлены на рис. 2.

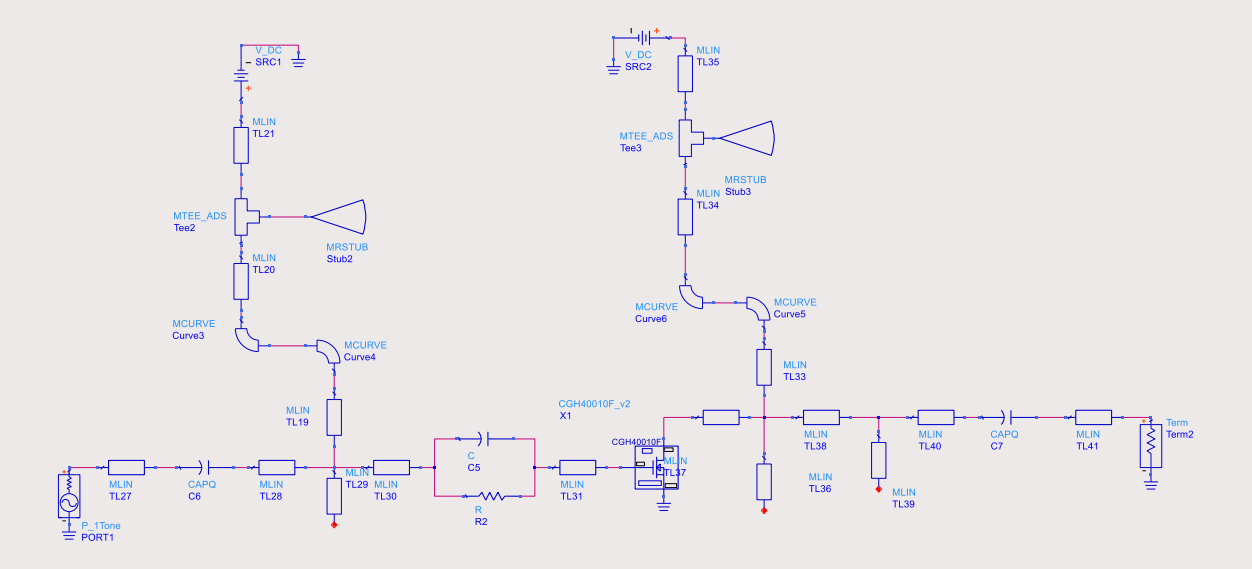


Рис. 1. *Общая структурная схема усилителя мощности класса F*

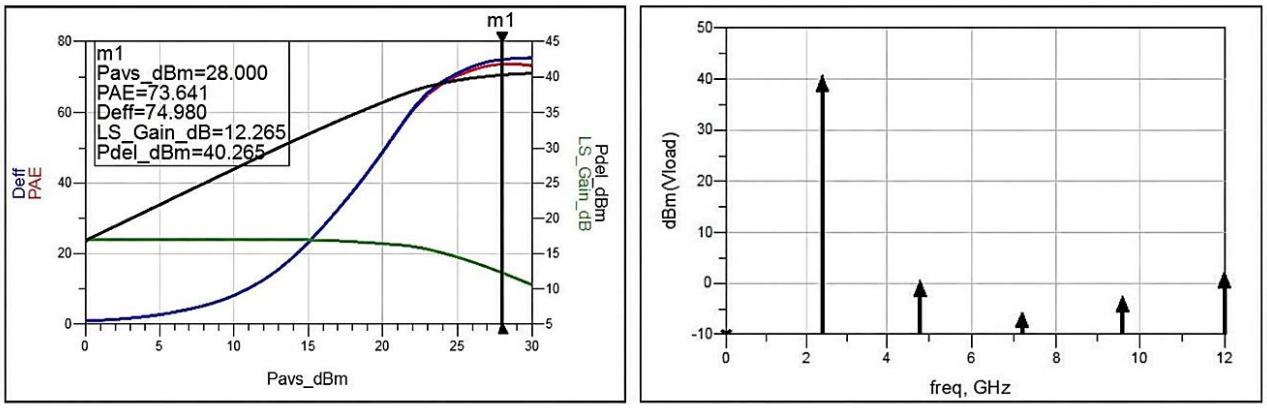


Fig. 2. *Результаты моделирования*

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 2, показывает, что разработанный усилитель обеспечивает энергетическую эффективность более 73 % при выходной мощности 40,4 дБм. При этом коэффициент усиления составляет 12,3 дБ. Из анализа спектра гармонических составляющих также следует, что в выходном сигнале, за исключением основной гармонической составляющей, дополнительные гармонические составляющие практически не наблюдаются. Полученные результаты моделирования соответствуют заданным требованиям и подтверждают работоспособность разработанного усилителя мощности класса F.

И. В. Филиппов
АО «НПП "Исток" им. Шокина», Фрязино, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ В ЦЕПИ ПИТАНИЯ АВТОГЕНЕРАТОРА НА ЕГО ФАЗОВЫЙ ШУМ

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования влияния низкочастотного шума в цепи питания автогенератора сверхвысоких частот с кольцевой обратной связью на его фазовый шум. Продемонстрирована эффективность применения эмиттерного повторителя с резистивно-емкостным контуром в цепи базы в качестве активного фильтра нижних частот. Выявлена линейная статистическая корреляция между низкочастотными флуктуациями напряжения питания и фазовым шумом автогенератора.
Ключевые слова: спектральная плотность мощности шума, спектральная плотность мощности фазового шума, автогенератор, активный фильтр, эмиттерный повторитель.
Для цитирования: Филиппов И. В. Влияние низкочастотного шума в цепи питания на фазовый шум автогенератора // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

I. V. Filippov
JSC "NPP "Istok" named after Shokin", Фрязино, Российская Федерация

EFFECT OF LOW-FREQUENCY FLUCTUATIONS IN THE POWER SUPPLY CIRCUIT OF AN OSCILLATOR ON ITS PHASE NOISE

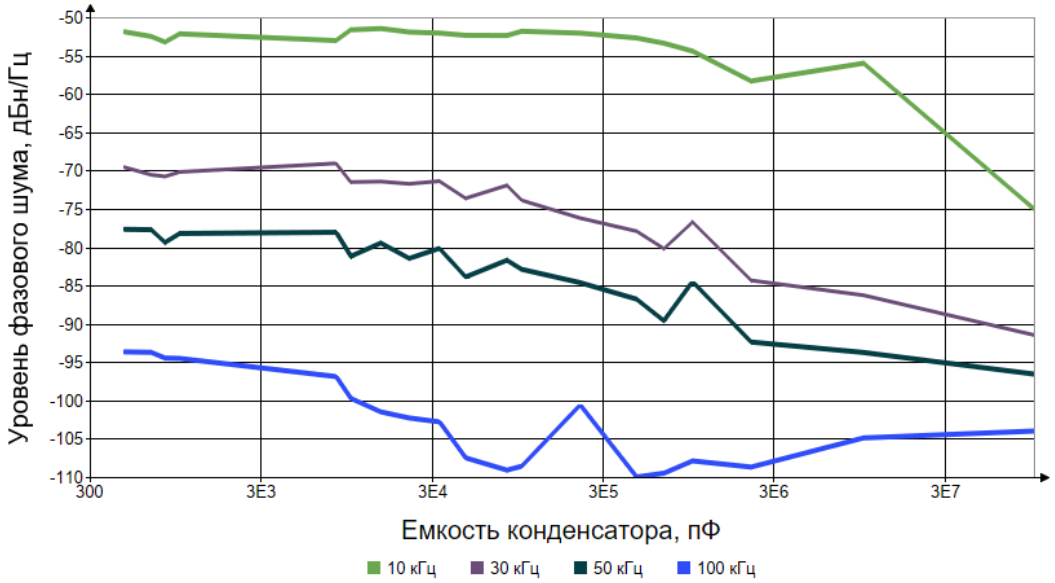
Abstract. The paper presents the results of an experimental study on the effect of low-frequency noise in the power supply circuit of a microwave ring oscillator on its phase noise. The efficiency of using an emitter follower with a resistive-capacitive circuit in the base as an active low-pass filter is demonstrated. A linear statistical correlation between low-frequency power supply voltage fluctuations and the oscillator phase noise is revealed.
Keywords: noise power spectral density, phase noise power spectral density, oscillator, active filter, emitter follower.
For citation*:* Filippov I. V. Effect of low-frequency noise in the power supply circuit on the phase noise of an oscillator // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter: Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В современных системах радиолокации и связи автогенераторы сверхвысоких частот широко применяются в качестве источников опорных и гетеродинных сигналов. Одной из главных причин появления фазового шума в таких устройствах являются низкочастотные флуктуации напряжения питания. Традиционно применяемые пассивные резистивно-емкостные и индуктивно-емкостные фильтры, а также типовые линейные стабилизаторы напряжения не всегда способны обеспечить необходимое подавление этих флуктуаций ввиду конструктивных и схемотехнических ограничений.

Объектом экспериментального исследования в данной работе выступает автогенератор сверхвысоких частот с кольцевой обратной связью, настроенный на рабочую частоту 10 ГГц. В качестве активного элемента в генераторе применена микросхема широкополосного интегрального усилителя, а частотно-избирательным элементом служит микрополосковый резонатор, выполненный на связанных линиях. Цепь питания устройства включает интегральный стабилизатор напряжения, на выходе которого установлен эмиттерный повторитель с резистивно-емкостным фильтром нижних частот в цепи базы. Данная схема действует как активный фильтр

нижних частот: благодаря коэффициенту передачи тока транзистора эквивалентная емкость фильтра многократно увеличивается. Это позволяет достичь сильного подавления низкочастотной составляющей шума при ограниченном падении напряжения.

В ходе работы произведена оценка влияния емкости конденсатора в цепи базы на спектральную плотность мощности флуктуаций в цепи питания усилителя и спектральную плотность мощности фазового шума выходного сигнала автогенератора. В рамках эксперимента емкость конденсатора варьировалась в диапазоне от 0 до 100 мкФ. Наилучший результат был достигнут при установке конденсатора номиналом 100 мкФ: зафиксировано снижение уровня фазового шума на 21 дБ при отстройках 10 кГц и 30 кГц, а также на 19,1 дБ при отстройке 50 кГц (см. рисунок).



Зависимость спектральной плотности мощности фазового шума формируемого автогенератором сигнала от емкости установленного конденсатора при фиксированных отстройках от несущей (10 кГц, 30 кГц, 50 кГц, 100 кГц)

Для количественной оценки взаимосвязи между флуктуациями напряжения в цепи питания и фазовым шумом автогенератора был применен корреляционный анализ. Расчет коэффициента корреляции Пирсона между спектрами низкочастотных флуктуаций по цепи питания и фазового шума для выборки, соответствующей 20 различным номиналам емкостей конденсаторов в цепи базы эмиттерного повторителя, выявил область линейной статистической связи в диапазоне отстроек от 5 до 150 кГц. В этой зоне коэффициент корреляции достигал значений от 0,7 до 0,94. Проведенное исследование показало высокую эффективность применения схемы эмиттерного повторителя для снижения спектральной плотности мощности шума сигналов автогенераторов.

А. А. Шабронов
Сибирский государственный университет телекоммуникации и информатики
Новосибирск, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ПОКРЫТИЯ РАДИОКАНАЛА 433 МГц С ПОМОЩЬЮ НАСТРАИВАЕМОЙ ПЕЧАТНОЙ АНТЕННЫ

Аннотация. Представлены конструкция и принцип настройки антенны на печатной плате в составе схемы репитера данных по радиоканалу 433 МГц. Антенна предназначена для работы в системе термометрии зерна на элеваторах вертикального хранения. Предлагаемая конструкция антенны имеет конструктивные перемычки, которыми настраивается оптимальное согласование и тем самым повышается дальность покрытия зоны связи. Конструкция антенны оптимизирована под настройку на объекте без специальных приборов и не имеет резьбовых и кабельных соединений. Практическая проверка показала увеличение зоны покрытия радиосвязи в 2–3 раза по сравнению с укороченной штыревой «спиральной» антенной, поставляемой для HC12 диапазона 433 МГц.
Ключевые слова: печатная антенна, КСВ, 433МГц, HC12.
Для цитирования: Шабронов А. А. Повышение дальности покрытия радиоканала 433 МГц с помощью настраиваемой печатной антенны // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. A. Shabronov

INCREASING THE COVERAGE RANGE OF A 433 MHz RADIO CHANNEL USING A TUNABLE PRINTED ANTENNA

Abstract. This paper presents the design and principle of tuning an antenna on a printed circuit board as part of a data repeater circuit operating over a 433 MHz radio channel. The antenna is designed to work in a grain thermometry system at vertical storage elevators. The proposed antenna design includes structural jumpers that are used to adjust the optimal impedance matching, thereby increasing the communication coverage range. The antenna design is optimized for tuning on site without special instruments and has no threaded or cable connections. Practical testing showed an increase in the radio communication coverage area by 2–3 times compared to the shortened pin “spiral” antenna supplied for the HC12 in the 433 MHz band.
Keywords: printed antenna, VSWR, 433 MHz, HC12.
For citation: Shabronov A. A. Increasing the coverage range of a 433 MHz radio channel using a tunable printed antenna // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter: Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Введение

Для уменьшения времени и объема производственных и монтажных работ предлагается альтернатива – антенна на печатной плате, совмещенная с модулем приемопередатчика. Такая конструкция антенны с приемопередатчиком устанавливается в корпусе из радиопрозрачного пластмассового материала и уменьшает риски повреждений в работе, поскольку все закрыто в один корпус.

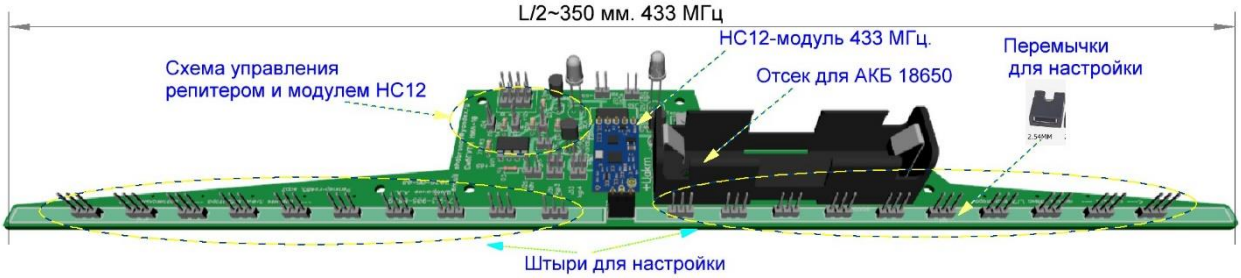


***Рис. 1**. 3d модель печатной платы антенны с модулем связи HC12*

Для настройки антенны на печатной плате под заданный диапазон и формирования оптимального согласования с модулем приема-передатчика через определенные промежутки на линии дорожки антенны сформированы отверстия для установки «штырей–перемычек». На рис. 1 представлена 3d модель печатной платы антенны с модулем связи HC12.

Изготовление и применение антенны

Антенна выполнена на печатной плате совместно с печатной трассировкой используемых модулей HC12 и другими элементами схемы репитера термометрии. Принципиальная схема, печатная плата подготовлены в редакторе DIP-TRACE и находятся в программе каталога тестов.

Данная конструкция антенны применена на промышленном объекте – элеваторе. Расположение антенных шкафов с репитерами представлено на рис. 2. Показан слева шкаф на улице, в средине второй шкаф с антенной внутри на стене верхней галереи элеватора и справа антенна и РПТ внутри шкафа. Между этими шкафами обеспечена связь для термометрии корпуса элеватора. Шкаф на улице вторым направлением связан с другим модулем и антенной также по радиоканалу. Такое расположение позволило «обойти» радиоканалу крупный металлический корпус – «зерно-сушительный» комплекс для формирования системы термометрии элеватора.

***Рис. 2**. Вид антенных шкафов*

Заключение

Схема и конструкция антенны на печатной плате предназначены для уменьшения затрат на монтаж и увеличение надежности системы термометрии элеватора при эксплуатации. Все элементы доступны без специальных высотных допусков, что повышает безопасность и ремонтопригодность системы термометрии.

Настройка антенны, проверка качества радиоканала возможна без специальных приборов или принадлежностей и доступна техническому персоналу объекта.

Э. Р. Шаповалов, С. В. Крутиев, С. П. Букин, М. А. Михайлов
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ВОЛНОВОДНЫЙ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР НА ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

Аннотация. Рассмотрена конструкция компактного пятиполюсного волноводного полосно-пропускающего фильтра Ku-диапазона на деформированных эллиптических резонаторах с дополнительной разделяющей пластиной, оптимизированная для монолитного изготовления методом селективного лазерного плавления (SLM). Проведены расчет модового состава и многопараметрическая оптимизация. Структура формирует полосу 13,75–16,50 ГГц при частоте 15,06 ГГц, обеспечивает согласование лучше 20 дБ и внеполосное заграждение свыше 40 дБ до 33,3 ГГц.
Ключевые слова: волноводный полосно-пропускающий фильтр, деформированный эллиптический резонатор, нули передачи, селективное лазерное плавление, широкая полоса заграждения.
Для цитирования: Шаповалов Э. Р., Крутиев С. В., Букин С. П., Михайлов М. А. Волноводный полосно-пропускающий фильтр на деформированных эллиптических резонаторах, изготовленный методом 3D-печати // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

E. R. Shapovalov, S. V. Krutiev, S. P. Bukin, M. A. Mikhailov
Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

WAVEGUIDE BANDPASS FILTER BASED ON DEFORMED ELLIPTICAL RESONATORS FABRICATED BY 3D PRINTING

Annotation. A compact 5-pole Ku-band waveguide bandpass filter based on deformed elliptical cavity resonators with an additional internal plate designed for monolithic metal 3D printing via selective laser melting (SLM) is considered. Electromagnetic modal analysis and global geometric optimization were performed. The optimized structure provides a 13,75–16,50 GHz passband at 15,06 GHz, return loss better than 20 dB, and extended stopband rejection exceeding 40 dB up to 33,3 GHz.
Keywords: waveguide bandpass filter; deformed elliptical resonator; transmission zeros; selective laser melting; metal 3D printing; wide stopband.
For citation: Shapovalov E. R., Krutiev S. V., Bukin S. P., Mikhailov M. A. Waveguide bandpass filter based on deformed elliptical resonators fabricated by 3D printing // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Современные приемопередающие тракты спутниковых и телекоммуникационных систем требуют высокой частотной избирательности при минимальных потерях и жестких ограничениях на массу и габариты СВЧ-устройств. Традиционные волноводные фильтры на объемных резонаторах обладают высокими характеристиками, однако их изготовление на станках с ЧПУ приводит к получению тяжелых сборных узлов. Селективное лазерное плавление металлов (SLM) обеспечивает высокую геометрическую свободу и позволяет монолитно создавать компактные легкие фильтры.

Для расширения полосы заграждения исследована структура на основе деформированных эллиптических резонаторов. Введение вертикальной пластины расщепляет квази-TE_{102} моду на квази-TE_{102} и квази-TE_{103}, формируя дополнительный полюс и нуль передачи. Схематическое представление исследуемого пятиполюсного фильтра приведено на рис. 1.

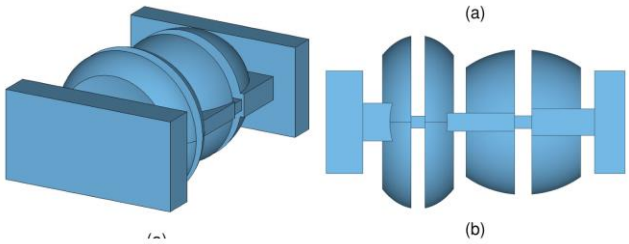


Рис. 1. *Схематическое изображение пятиполюсного волноводного фильтра на деформированных эллиптических резонаторах: a – перспективный вид внутреннего объема; b – вид сбоку*

При каскадировании резонаторов прямоугольные секции образуют единый тракт с модой TE_{101}, вносящей один общий полюс. Каждая эллиптическая полость добавляет два полюса, поэтому порядок фильтра нечетный: N = 2n + 1 (для двух полостей N = 5). Электродинамический расчет и оптимизация методом CMA-ES выполнялись в среде CST Studio Suite. Начальные размеры определялись по параметрическим кривым нормализованной частоты. Габариты корпуса фильтра со стандартными фланцами WG18 составили 33,30 × 33,30 × 22,42 мм.

Результирующая амплитудно-частотная характеристика фильтра приведена на рис. 2. В рабочей полосе 13,75–16,50 ГГц (центральная частота 15,06 ГГц, относительная полоса 18,26 %) сформированы пять полюсов пропускания. Согласование в полосе лучше 20 дБ, а расчетная ненагруженная добротность резонатора для мод TE_{101}, квази-TE_{102} и квази-TE_{103} равна 2026, 2842 и 2558.

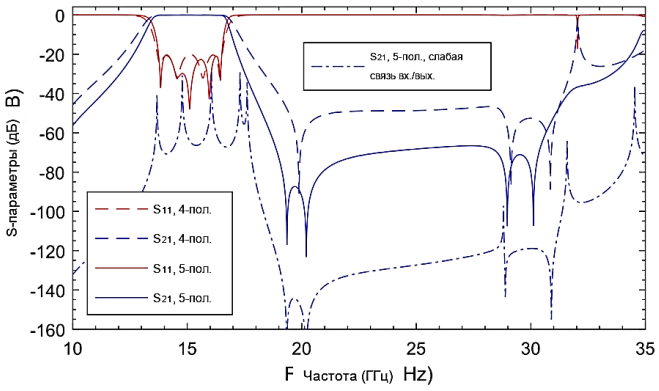


Рис. 2. *Амплитудно-частотная характеристика пятиполюсного волноводного фильтра: сплошная линия – расчетный коэффициент передачи пятиполюсного фильтра, пунктирная линия – четырехполюсного фильтра, штриховая линия – коэффициент отражения*

На частотах 19,0, 28,8 и 31,58 ГГц формируются глубокие нули передачи, обеспечивающие затухание свыше 40 дБ до 33,3 ГГц (более $2{,}21f_0$). Монолитная SLM-печать под углом 45° к платформе и 90° к ракелю исключила сборочные потери и дефекты нависания, а электрополировка медных образцов снизила шероховатость, обеспечив измеренные потери 0,52–0,65 дБ.

Таким образом, фильтр на деформированных эллиптических резонаторах сочетает высокую избирательность, широкое заграждение и малые потери с технологичностью 3D-печати. Отсутствие внутренних технологических поддержек делает данное решение перспективным для бортовой спутниковой аппаратуры Ku- и Ka-диапазонов и приемопередающих трактов радиолокации.

М.В. Батищева, В.И. Анисимова
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ РЕЗКИ МНОГОСЛОЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ

Аннотация. Приведены особенности способов резки многослойных керамических плат и возможность их комбинирования при выполнении нестандартных производственных задач.
Ключевые слова*:* низкотемпературная керамика**,** керамические платы, резка на модули.
Для цитирования*:* Батищева М.В., Анисимова В.И. Особенности резки многослойных керамических плат // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

M. V. Batishcheva, V. I. Anisimova
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

SPECIFICITY PROPERTIES CUTTING OF THE MULTILAYER CERAMIC BOARDS

Annotation. In paper presented specificity properties cutting of the multilayer ceramic boards and possibility combining them by carrying out irregular job-related issues.
Keywords*:* low temperature co-fired ceramics, ceramic boards, cutting into boards.
For citation*:* Batishcheva M. V., Anysymova V. I. Specificity properties cutting of the multilayer ceramic boards // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В связи со сложившейся геополитической обстановкой и постановлениями правительства о необходимости развития собственных технологий и перевода изделий на отечественные материалы и комплектующие, увеличилось количество запросов на изготовление устройств СВЧ-диапазона на подложках из низкотемпературной совместнообжигаемой керамики (LTCC). При этом габаритные размеры запрашиваемых изделий варьируются от 3,2×1,6 мм до 78×78 мм. Технология низкотемпературной керамики позволяет изготавливать изделия различного назначения, такие как интерпозеры, платы подложек микросхем, платы для генераторов, резонаторов и микросборок, радиочастотные фильтры, делители мощности, фазовращатели, направленные ответвители и т.д. Данная технология особенно актуальна для устройств высокоскоростной обработки сигналов, где необходимо обеспечение высоких тепловых и электрических параметров с одновременным повышением надежности изделий.

Как известно, технология LTCC предусматривает изготовление многослойных плат на керамической основе из отдельных листов, на которых предварительно сформированы межслойные и теплоотводящие отверстия, элементы полостей и окон, и методом трафаретной печати нанесены проводниковые, диэлектрические и резистивные элементы. Одиночные листы собираются в стек, который подвергается опрессовке при определенных значениях температуры и

давления. После этого опрессованный стек разрезается на отдельные платы. Стек или отдельные платы обжигаются в едином цикле. Температура обжига низкотемпературной керамики ниже 900°С, что делает возможным применение золотых и серебряных проводящих паст для формирования межслойных соединений и топологии.

При производстве многослойных керамических плат, традиционно применяются два способа резки:

- гильотинная резка (до спекания);
- дисковая резка (после спекания).

Рассмотрим подробно особенности каждого из двух способов.

Гильотинная резка. Гильотинная резка является традиционным и самым рациональным способом при изготовлении многослойных керамических плат. Гильотинный нож позволяет делать прямолинейный срез с высокой точностью и минимальным термическим воздействием на материал. Кроме того, установка гильотинной резки (СМ-15А и подобные) имеет высокую производительность и достаточно проста в эксплуатации.

Опрессованный керамический стек на самоклеящейся подложке Thermal Release Sheet фиксируется на вакуумном столе установки резки и с помощью заранее написанной программы (индивидуально под каждое изделие) производится резка по осям X и Y. После этого липкая основа отделяется от разрезанных плат, а сами платы передаются на операцию спекания.

Данный способ применим только для «сырых» плат простой формы толщиной до 3 мм. Кроме того, способом гильотинной резки невозможно разрезать изделия разного размера на одном стеке, а при габаритных размерах изделий меньше 7×5 мм нож тянет за собой модули от чего точность последующих резов снижается.

Дисковая резка. Дисковая резка такая, как ADT, используется как дополнительная операция при обработке керамических плат и применяется для разрезки спечённых изделий толщиной до 2 мм и габаритными размерами меньше 7×5 мм. Для этого стек предварительно разделяется на групповые модули до 50×50 мм на установке гильотинной резки, после чего данные модули притираются на стеклянную основу, например, с помощью пицеина. Данный вид фиксации отлично подходит для низкотемпературной керамики и удерживает платы на стеклянной основе при подаче водяного охлаждения пилы в процессе резки.

Обработка низкотемпературной керамики с помощью установки дисковой резки ADT подразумевает применение алмазных или резиновых дисков различной толщины. Для получения качественного реза требуется правильно подобранный инструмент, чёткое соблюдение технологии и высокая квалификация оператора. Кроме того, толщина плат не должна превышать 2 мм, что обусловлено величиной вылета пилы. К недостаткам данного способа можно отнести необходимость дополнительной химической обработки плат от следов притирочного материала, что усложняет и удлиняет технологический процесс.

При повышении требований к точности линейных размеров или для изделий разных габаритных размеров на одном стеке могут быть применены следующие способы резки:

- проволочная резка;
- гильотинная резка с применением шаблона.

Многопроволочная резка. Разделение керамических плат способом проволочной резки используется только для изделий после спекания. Разрезка групповых модулей на платы производится на установке проволочной резки (в нашем случае STX-1203 Diamond Wire Saw) металлической проволокой с алмазным напылением толщиной 0,25 мм. Данный способ позволяет разрезать керамические модули толщиной более 2 мм с сохранением точности +/- 0,01 мм, но имеет существенный недостаток – низкую скорость резки до 0,3 мм/мин. Это значительно увеличивает время процесса изготовления и не подходит для массового производства. Многопроволочная резка в основном используется при обрезке технологических полей и армирующих контуров на изделиях с повышенными требованиями к линейным размерам или при разделении изделий на отдельные миниатюрные модули с габаритными размерами 3,2×1,6 мм и меньше.

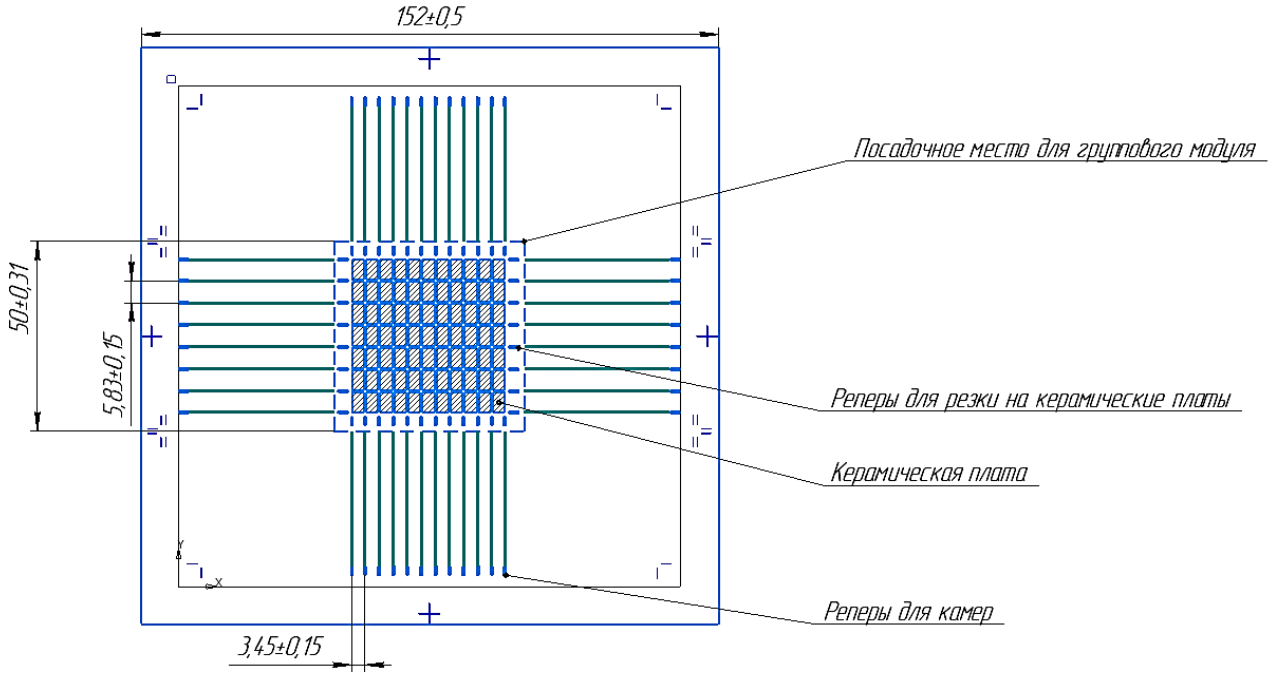
Гильотинная резка с применением шаблона. Методика использования гильотинной резки с применением шаблона была разработана в связи с большим количеством запросов на изготовление опытных партий изделий с перспективой серийного производства. Учитывая вы-

сокую стоимость материалов для изготовления многослойных керамических плат малой партийности существует целесообразность компоновки нескольких видов изделий на одном стеке. Данная методика подходит для изделий с одинаковым набором диэлектрических слоёв, но при этом может сочетать на одном стеке несколько видов плат разных форм и размеров.

При разработке рабочих файлов пробивки и фотошаблонов на один стек располагают несколько групповых модулей содержащих послойную раскладку каждого изделия с индивидуальными реперными знаками для резки.

Как указано выше для резки многослойных керамических плат применяется установка гильотинной резки (типа СМ-15А). Недостатком данной установки является жесткое позиционирование камер, которое задано на заводе в соответствии с размерами применяемых керамических листов (5-, 6- или 8-дюймовые). При работе с 6-ти дюймовыми керамическими листами приближение камер установки до реперных знаков (маркеров) должно быть равно 70 мм. Поэтому для резки могут быть использованы только стандартные размеры стеков (152×152 мм).

Для устранения данного недостатка был разработан шаблон для резки (см. рис.), на котором размещены реперные знаки, находящиеся в видимости рабочего поля камер визуального контроля установки, а в его центре квадрат 50×50 мм – посадочное место для группового модуля. До применения шаблона для разрезки, стек разрезают по стандартному технологическому процессу на групповые модули 50×50 мм. Шаблоны для резки распечатывают на офисной бумаге индивидуально для каждого группового модуля. С помощью канцелярского ножа в шаблоне вырезают посадочные места для групповых модулей. На вакуумный стол установки размещают подложку самоклеящуюся Thermal Release Sheet, на которую приклеивают шаблон для резки. В центре шаблона располагают групповой модуль. Реперные знаки модуля совмещают с реперными знаками шаблона для резки и производят разрезку согласно технологическому процессу. Таким образом, мы имитируем стандартный керамический стек и можем разрезать групповой модуль на керамические платы нужного размера.



Пример шаблона для разрезки групповых модулей на керамические платы

Данный способ разрезки помогает значительно сократить затраты на изготовление небольших опытных партий изделий. Стандартный стек вмещает до четырёх групповых модулей размером 50×50 мм, таким образом, время изготовления сокращается в четыре раза соответственно. Также предложенный способ может быть применен не только для 6-дюймовых керамических листов, но и для листов других типоразмеров. Гильотинная резка с применением шаблона позволяет исключить необходимость применения дисковой и проволочной резки, что так же скажется на сокращении времени технологического процесса.

Таким образом, возможность использования и комбинирования различных способов

резки многослойных керамических плат позволяет выполнять нестандартные производственные задачи при изготовлении изделий с габаритными размерами от 3,2×1,6 мм (и меньше) до 78×78 мм, в том числе изделий с повышенными требованиями к линейным размерам. Предложенный в ходе работы шаблон для гильотинной резки позволяет изготавливать несколько видов изделий в рамках одного стека, что значительно снижает затраты на материалы и время технологического цикла. Это особенно актуально для изготовления опытных партий образцов и увеличения скорости выхода на серийное производство.

А. Л. Богословцева, П. В. Гейдт
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ Al НА ШЕРОХОВАТОСТЬ Mo В БРЭГГОВСКОМ ОТРАЖАТЕЛЕ НА ОСНОВЕ ПАРЫ Al/Mo

Аннотация. Показано, что снижение температуры напыления при формировании слоя алюминия (Al) методом магнетронного распыления приводит к уменьшению шероховатости. Демонстрируется, что при использовании в брэгговском отражателе пары Mo/Al шероховатость верхнего слоя Mo с увеличением числа пар изменяется в пределах 8 нм. Такое значение параметра шероховатости позволяет получить пьезоэлектрический слой нитрида алюминия (AlN) с кристаллической структурой, пригодной для создания высокоэффективных акустических резонаторов.
Ключевые слова: брэгговский отражатель, атомно-силовая микроскопия, многослойная структура Mo/Al.
Для цитирования: Богословцева А. Л., Гейдт П. В. Влияние Al на шероховатость Mo в брэгговском отражателе на основе пары Al/Mo // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. L. Bogoslovtseva, P. V.Geydt
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

Al INFLUENCE ON THE ROUGHNESS OF Mo IN A BRAGG REFLECTOR BASED ON AN Al/Mo PAIR

Annotation. This paper demonstrates that reducing the deposition temperature during magnetron sputtering of an aluminum (Al) layer results in a reduction in roughness. It is demonstrated that when using a Mo/Al pair in a Bragg reflector, the roughness of the upper Mo layer varies within 8 nm with increasing pair number. This roughness parameter makes it possible to obtain a piezoelectric aluminum nitride (AlN) layer with a crystalline structure suitable for creating highly efficient acoustic resonators.
Keywords*:* Bragg reflector, atomic force microscopy, Mo/Al multilayer structure.
For citation*:* Bogoslovtseva A. L., Geydt P.V. Al influence on the roughness of Mo in a bragg reflector based on an Al/Mo pair// Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Для получения эффективного резонатора с брэгговским отражателем на объемных акустических волнах необходимо контролировать каждый слой многослойной структуры, то есть слои брэгговского отражателя и пьезоэлектрического слоя с электродами. Использование алюминия в качестве слоя брэгговского отражателя позволит сократить количество мишеней и магнетронов в установке, что повышает экономическую выгоду производства серийных резонаторов. Однако, существует проблема, связанная с развитием шероховатости алюминия, что ведет к деградации всей многослойной структуры резонатора. Целью данной работы была оценка развития шероховатости слоя алюминия в многослойной структуре и изучение способов уменьшить влияние шероховатости алюминия на многослойную структуру.

На первом этапе было показано, что с увеличением температуры роста пленок алюминия происходит развитие морфологии поверхности пленок и среднеквадратичная шероховатость может достигать 63 нм в случае применения температур порядка 300 °C, в то время как при напылении без дополнительного нагрева подложки среднеквадратичная шероховатость составляет порядка 11 нм. Следующим этапом исследования было исследование изменения шероховатости слоев при напылении многослойной структуры. При росте тонких пленок на поверхности с развитой морфологией нижележащие слои будут увеличивать шероховатость верхних слоев, важным является оценка динамики этого влияния. В качестве второго слоя брэгговского отражателя и нижнего электрода планировалось использовать Mo, поэтому оценивалась изменение его шероховатости. Был произведен рост образцов до 7 слоев (что соответствует 3,5 парам материалов с разными акустическими импедансами), шероховатость каждого слоя впоследствии оценивалась с помощью АСМ. Показано, что рост пленки Mo оказывает сглаживающий эффект и среднеквадратичная шероховатость верхнего слоя Mo в случае семислойного образца не превышает 8 нм, что делает его приемлемым для получения на его основе пьезоэлектрического слоя и резонатора.

Таким образом, была показана возможность использования слоя алюминия в составе брэгговского отражателя на паре Mo/Al для применения в резонаторах для передачи данных.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Проект № FSUS-2024-0020). Рост и измерение образцов выполнено в АТИЦКП НГУ.

Благодарим коллег В. Р.Шаяпова, С. Ю.Чепкасова, А. В.Капишникова за помощь в росте и характеризации образцов.

Н. А. Давлеткильдеев
Омский научный центр СО РАН, Омск, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА В ИНДИВИДУАЛЬНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ АЗОТОМ

Аннотация. Выявлен устойчивый поперечный пьезоэлектрический отклик индивидуальных углеродных нанотрубок, легированных азотом. Показано, что поперечный пьезоэлектрический коэффициент нанотрубок линейно возрастает с увеличением их внешнего диаметра. Установлена сильная положительная корреляционная связь между данными параметрами нанотрубок с коэффициентом корреляции Пирсона r=0,93.
Ключевые слова*:* многостенные углеродные нанотрубки, легирование азотом, силовая микроскопия пьезоотклика, поперечный пьезоэлектрический коэффициент.
Для цитирования*:* Давлеткильдеев Н. А. Определение поперечного пьезоэлектрического коэффициента в индивидуальных углеродных нанотрубках, легированных азотом // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

N. A. Davletkildeev
Omsk Scientific Center SB RAS, Omsk, Russian Federation

DETERMINATION OF TRANSVERSE PIEZOELECTRIC COEFFICIENT IN INDIVIDUAL NITROGEN-DOPED CARBON NANOTUBES

Annotation. The study reveals a consistent transverse piezoelectric response in individual nitrogen-doped carbon nanotubes. It is shown that the transverse piezoelectric coefficient of the nanotubes increases linearly with their outer diameter. A strong positive correlation between these nanotube parameters, with a Pearson correlation coefficient of r = 0.93 is established.
Keywords*:* multi-walled carbon nanotubes, nitrogen doping, piezoresponse force microscopy, transverse piezoelectric coefficient.
For citation*:* Davletkildeev N. A. Determination of transverse piezoelectric coefficient in individual nitrogen-doped carbon nanotubes // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

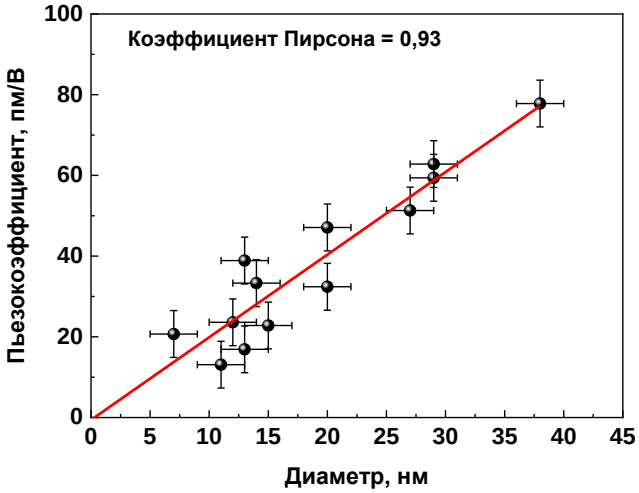
В массивах вертикально ориентированных углеродных нанотрубок, легированных азотом, обнаружен аномальный продольный пьезоэлектрический отклик со значением пьезоэлектрического коэффициента, достигающим 200 пм/В, что существенно превышает значения для типичных пьезоэлектрических наноматериалов. Возникновение пьезоэлектрического эффекта связывают с асимметричным перераспределением плотности электронов в искривленной графеновой плоскости бамбукообразных «перемычек» в полости нанотрубки в результате внедрения азота пиррольного типа. Обнаружение пьезоэлектрического отклика в азот-легированных углеродных нанотрубках открывает перспективы их использования в нанопьезотронных устройствах – датчиках деформации и давления, наногенераторах электрической энергии и других. Перспективным направлением применения таких нанотрубок является разработка электродных материалов для суперконденсаторов. Использование углеродных нанотрубок, легированных азотом в качестве основного материала электродов, благодаря пьезоэффекту позволит

обеспечить их циклическую стабильность за счет сохранения объема электрода при его насыщении ионами электролита.

Целью данной работы является количественное определение поперечного пьезоэлектрического отклика индивидуальных многостенных азот-легированных углеродных нанотрубок и установление зависимости между их внешним диаметром и величиной поперечного пьезоэлектрического коэффициента.

Исследовались углеродные нанотрубки, синтезированные пиролизом ацетонитрила на каталитических частицах железа, образованных при термическом разложении ферроцена. Содержание азота в нанотрубках составляло 4 ат. %. Образцами служили индивидуальные нанотрубки, осажденные на тонкий слой золота, нанесенный на ситалловую подложку. Измерения пьезоэлектрического отклика выполнялись на атомно-силовом микроскопе MFP-3D SA методом сканирующей силовой микроскопии пьезоотклика в резонансном режиме с помощью методики двухчастотного отслеживания частоты контактного резонанса. Для измерений использовались кремниевые кантилеверы серии CSG01 с Pt-покрытием и номинальной жесткостью 0,02 Н/м. Амплитуда переменного напряжения, прикладываемого между зондом и подложкой составляла 1 В. Для регистрации истинного пьезоотклика измерения производились в условиях компенсации электростатических сил путем приложения к зонду соответствующего постоянного электрического смещения.

На основе полученных топографических изображений и изображений пьезоотклика индивидуальных нанотрубок определялись их внешний диаметр и поперечный пьезоэлектрический коэффициент. Для установления связи между данными параметрами построена корреляционная зависимость, на которой точки экспериментальных данных четко группируются вдоль аппроксимирующей прямой (см. рис.). Коэффициент корреляции Пирсона, рассчитанный для данной выборки данных, составил 0,93, что свидетельствует о сильной положительной корреляционной связи между внешним диаметром и поперечным пьезоэлектрическим коэффициентом нанотрубок.



Корреляционная зависимость поперечного пьезоэлектрического коэффициента от внешнего диаметра углеродных нанотрубок

Таким образом, выявлен устойчивый поперечный пьезоэлектрический отклик индивидуальных углеродных нанотрубок, легированных азотом. Поперечный пьезоэлектрический коэффициент нанотрубок линейно возрастает с увеличением их внешнего диаметра и достигает величины 80 пм/В при диаметре 40 нм. Установлена сильная положительная корреляционная связь между данными параметрами нанотрубок с коэффициентом корреляции Пирсона r=0,93.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 126012716038-5).

Е. И. Дьяченко, В. А. Чуклин, А. С. Паленова, А. Н. Кузнецов
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ПРЕЦИЗИОННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПРЕФОРМ ПРИПОЯ ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ МЕТОДОМ АЛМАЗНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ РЕЗКИ

Аннотация. Рассмотрен технологический подход к изготовлению преформ припоя из тонкой металлической фольги методом прецизионной механической резки с использованием алмазного дискового или проволочного инструмента. Целью данного доклада является исследование современных методов изготовления преформ припоя, а также рассмотрение усовершенствованного подхода резки припоя с ровным краем реза без термического воздействия и предотвращения повреждений припоя.
Ключевые слова*:* алмазная резка, преформы припоя, припойная фольга, формирование преформ, резка кристаллов.
Для цитирования*:* Дьяченко Е. И., Чуклин В. А., Паленова А. С., Кузнецов А.Н. Прецизионное формирование преформ припоя для микро- и наноэлектроники методом алмазной механической резки // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

E. I. Dyachenko, V. A. Chuklin, A. S. Palenova, A. N. Kuznetsov
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

PRECISION FORMATION OF SOLDER PREFORMS FOR MICRO- AND NANOELECTRONICS BY DIAMOND MECHANICAL CUTTING

Annotation. The article discusses a technological approach to the manufacture of solder preforms from thin metal foil by precision mechanical cutting using diamond, disc or wire tools. The purpose of this talk is to explore modern methods for making solder preforms, as well as to consider an im-proved approach to cutting solder with a smooth cut edge without heat exposure and preventing damage to the solder.
Keywords*:* diamond cutting, solder preforms, solder foil, preform forming, crystal cutting.
For citation*:* Dyachenko E. I., Chuklin V. A., Palenova A. S., Kuznetsov A. N. Method of manufacturing solder preforms of given geometric dimensions from solder foil or tape // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Современное развитие микро- и наноэлектроники сопровождается переходом к более компактным конструкциям электронных устройств, повышению плотности размещения компонентов и увеличению требований к надёжности соединений.

Одним из критических элементов современных технологий является процесс формирования паяного соединения между полупроводниковым кристаллом и основанием корпуса. В отличие от традиционного нанесения припойной пасты использование преформ позволяет обеспечить строго заданное количество припоя, стабильную толщину соединительного слоя и высокую повторяемость процесса.

Исследования по данной технологии показывают, что конструкция припойной преформы оказывает существенное влияние на характеристики соединения. Дальней-

шая миниатюризация электронных устройств требует совершенствования не только состава припоя, но и технологии формирования самих преформ.

Целью данного исследования является изучение современных методов изготовления преформ припоя, а также рассмотрение усовершенствованного подхода резки припоя с ровным краем реза без термического воздействия и предотвращения повреждений припоя.

Резка металлической фольги является предметом активных исследований, направленных на повышение точности, снижение отходов и сохранение целостности материала. Традиционные методы резки включают механическую, лазерную и ультразвуковую обработку, однако каждый из них имеет свои ограничения. Например, лазерная резка обеспечивает высокую точность, но может вызывать термическое повреждение и деформацию тонких и хрупких материалов. Механическая резка часто приводит к образованию микротрещин и неровностей на кромке, что особенно критично для хрупких сплавов.

Предлагаемый подход к формированию преформ припоя методом алмазной механической резки представляет собой перспективное направление развития технологий микро- и наноэлектроники.

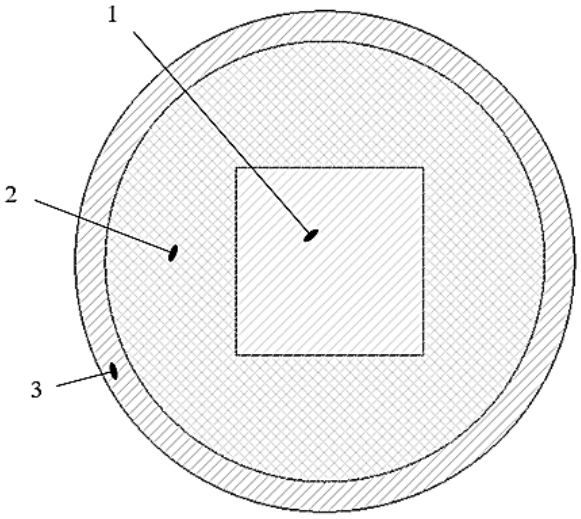


Рис. 1. *Вид формирования преформ заданных геометрических размеров: 1 – припойная лента, 2 – пленка, 3 – рамка*

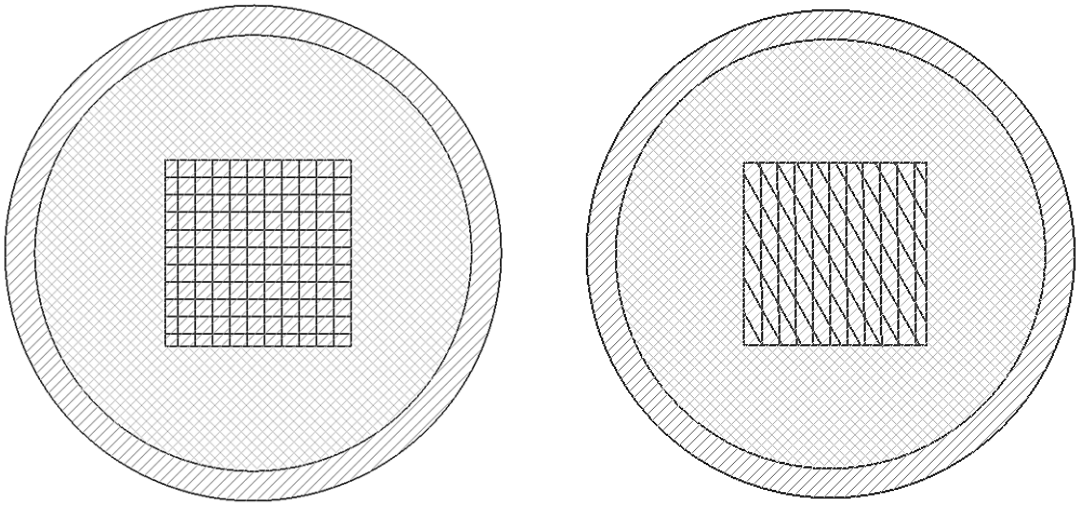


Рис. 2. *Резка ленты на четырехугольные преформы*

В процессе формирования преформ припойная лента предварительно фиксируется на пленке, приклеенной на рамку (рис. 1), затем с использованием оборудования для резки кристаллов с алмазными пилами производится резка ленты на четырехугольные преформы (рис. 2). Резка проводится с применением охлаждающей жидкости, что позволяет получать ровные кромки без повреждений и термического обугливания. Размещение преформ на пленке обеспечивает возможность автоматизированной укладки с использованием иглы для поддевания и вакуумного захвата.

Технический результат достигается путем выполнения резки припоя с ровной кромкой реза, при исключении термического воздействия и предотвращении повреждений припоя, а также за счет создания условий для автоматизированной укладки с применением иглы для поддевания и вакуумного захвата.

Использование алмазного режущего инструмента в сочетании с фиксацией фольги на адгезионной подложке и контролируемым охлаждением позволяет обеспечить высокую точность геометрии, минимальное повреждение материала и совместимость с автоматизированными процессами сборки.

Сравнение с современными методами резки, включая лазерную и механическую, подтверждает преимущества предложенного подхода, особенно для обработки тонких и хрупких материалов. Результаты исследования открывают перспективы для внедрения данного метода в промышленное производство и дальнейшей оптимизации технологических параметров.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение области применения метода на другие типы металлических фольг и интеграцию с автоматизированными системами резки.

Н. М. Егоров, А. А. Левицкий, Л. А. Лишнев, П. С. Маринушкин
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

К ОЦЕНКЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА КРЕМНИЕВОГО АВТОЭМИССИОННОГО КАТОДА

Аннотация. Проблема деградации автоэмиссионных катодов обусловлена высокими плотностями тока автоэлектронной эмиссии и связанным с ними значительным резистивным разогревом. С целью анализа тепловых процессов в полевом эмиттере рассмотрена модель полупроводникового автоэмиссионного катода, учитывающая джоулев нагрев, а также обеспечивающая возможность учета влияния температурных зависимостей электропроводности и теплопроводности материала катода, Ноттингам-эффекта. Представленные результаты позволяют оценить влияние величины эмиссионного тока и конструкции автоэмиссионного катода на его тепловой режим.
Ключевые слова*:* полевая эмиссия, микроэлектроника, Ноттингам-эффект, температурное поле.
Для цитирования*:* Егоров Н. М., Левицкий А. А., Лишнев Л. А., Маринушкин П. С. К оценке теплового режима кремниевого автоэмиссионного катода // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

N. M. Egorov, A. A. Levitskiy, L. A. Lishnev, P. S. Marinushkin
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

ESTIMATION OF THE THERMAL MODE OF A SILICON FIELD EMISSION CATHODE

Annotation. The problem of the degradation of field emission cathodes is caused by high current densities of field electron emission and the associated significant resistive heating. To analyze the thermal processes in the field emitter, a model of a semiconductor field emission cathode is considered, which takes into account Joule heating and also provides the possibility of accounting for the influence of the temperature dependence of the electrical conductivity and thermal conductivity of the cathode material, as well as the Nottingham effect. The presented results make it possible to assess the influence of the emission current value and the design of the field emission cathode on its thermal regime.
Keywords*:* field emission, microelectronics, Nottingham effect, temperature field.
For citationa Egorov N. M., Levitskiy A. A., Lishnev L. A., Marinushkin P. S. Estimation of the thermal mode of a silicon field emission cathode // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Свидетельством постоянного интереса к применению автоэмиссии в микроэлектронике являются работы по созданию новых типов вакуумных микроэлектронных устройств. Однако одним из наиболее важных вопросов по-прежнему остается надежность автоэмиссионных катодов (полевых эмиттеров). Большая плотность тока в катоде (до 10^6 А/см2 и более) может привести к его повреждениям из-за сильного нагрева. Это подтверждается тем, что вышедшие из строя катоды часто имели признаки «таяния». Во многих случаях повреждения полевых эмиттеров остаются плохо предсказуемыми.

В данной работе обсуждаются вопросы, связанные с учетом джоулева нагрева микроострия полупроводникового полевого эмиттера.

Был проанализирован вариант полупроводниковой автоэмиссионной структуры, представляющей собой упорядоченный массив острийных микроэмиттеров (рис. 1).

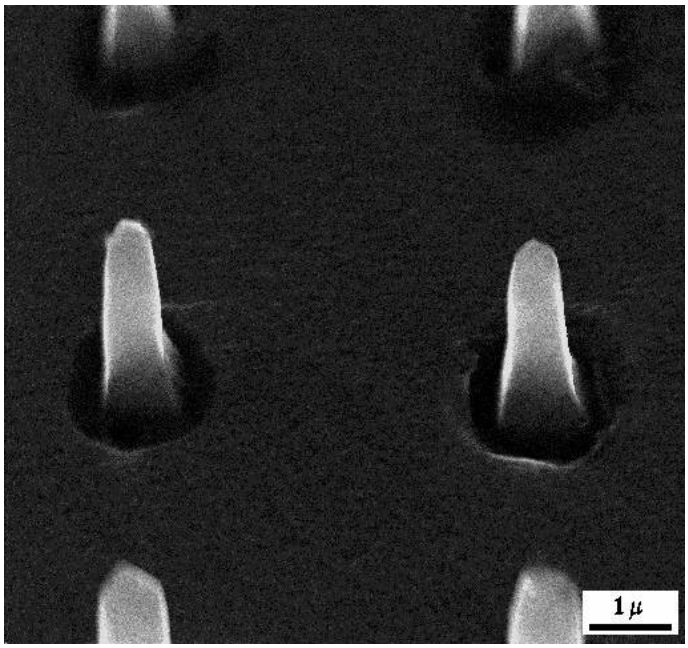


***Рис. 1**. Массив полупроводниковых острийных эмиттеров*

Распределение температуры определяется для стационарного режима с помощью численного моделирования (рис. 2).

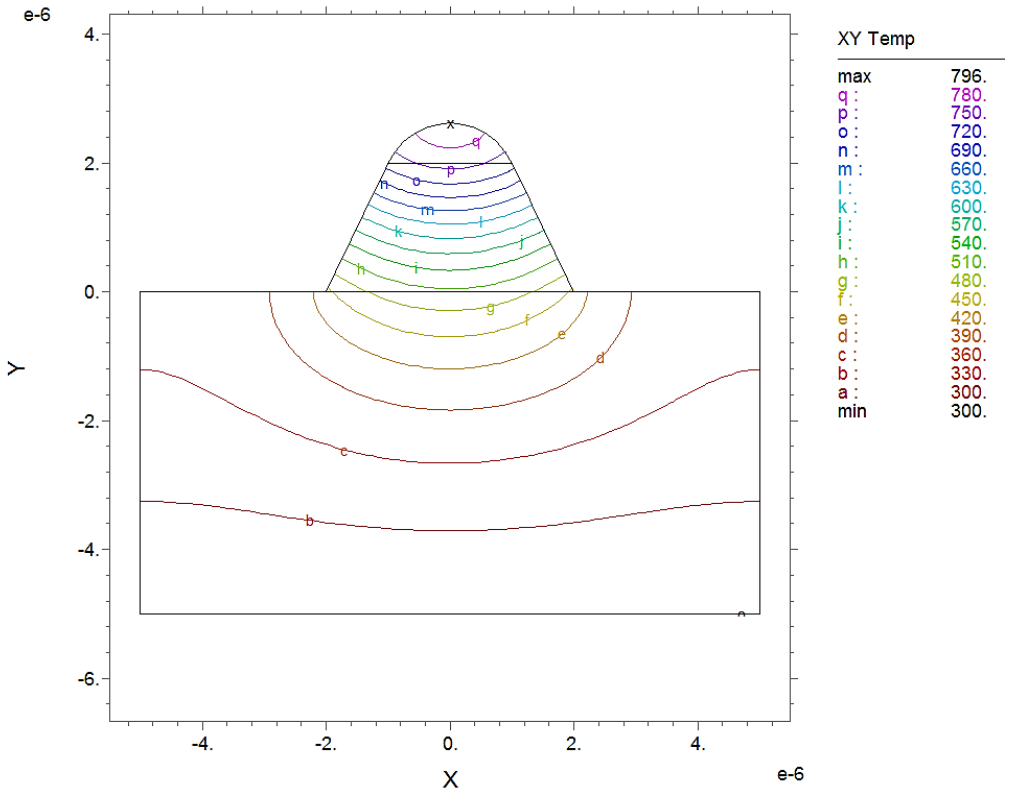


***Рис. 2**. Расчетное распределение температуры в острийном эмиттере*

В расчетной модели учитывались температурные зависимости электропроводности и теплопроводности материала эмиттера.

Результаты моделирования соответствуют общим представлениям о распределении температуры в автоэмиссионных катодах. Наибольший нагрев наблюдается в верхней части эмиттера из-за высокой плотности тока на этом участке.

Расчеты показывают, что рост температуры эмиттера происходит по нелинейному закону, что определяется основными механизмами, определяющими тепловой режим автоэмиссионных структур.

Сильный разогрев острия, при котором могут быть получены температуры порядка нескольких сотен градусов, наблюдается даже при относительно небольших токах, протекающих через эмиттер.

Учет Ноттингам-эффекта вносит заметные уточнения в результаты расчета. Следует также отметить, что в реальных устройствах тепловое излучение нагретого конуса может вносить заметный вклад в распределение температуры в катода. Анализ результатов показывает, что при сильном нагреве полевого эмиттера необходимо учитывать возможность возникновения заметного вклада от термоэмиссии.

Работа поддержана в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (номер FSRZ-2026-0010).

Н. М. Жилин[1,2], Т. Н. Улаева[1,2,3], А. Ю. Куклев[1,2,3]
Н. А. Чириков[1,2], Ю. С. Зонова[1,2], А. Н. Кузнецов[1,2]
[1]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация
[3]Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО СЛОЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ОАВ-РЕЗОНАТОРА С БРЭГГОВСКИМ ОТРАЖАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК МОЛИБДЕНА И ТИТАНА

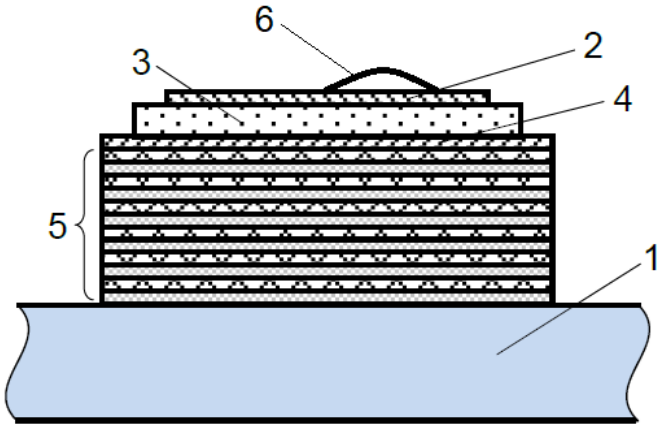
Аннотация. Представлены результаты исследования влияния чувствительного слоя фоторезиста ФП-383 и паров ацетона на характеристики тонкопленочного ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем Mo-Ti на частоте около 4 ГГц. Нанесение фоторезиста приводит к снижению резонансной частоты и изменению добротности. При воздействии паров ацетона частота последовательного резонанса снижается на 2,81 МГц, активная проводимость уменьшается, а добротность и эффективный коэффициент электромеханической связи возрастают.
***Ключевые слова**:* ОАВ-резонатор, брэгговский отражатель, газовый сенсор.
***Для цитирования**:* Жилин Н. М., Улаева Т. Н., Куклев А. Ю., Чириков Н. А., Зонова Ю. С., Кузнецов А. Н. Исследование влияния иммобилизации чувствительного слоя на электрические характеристики тонкопленочного ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем на основе пленок молибдена и титана // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

N. M. Zhilin[1,2], T. N. Ulaeva[1,2,3], A. Yu. Kuklev[1,2,3]
N. A. Chirikov[1,2], Yu. S. Zonova[1,2], A. N. Kuznetsov[1,2]
[1]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radio physics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation
[3]Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

STUDY OF THE EFFECT OF IMMOBILIZATION OF THE SENSITIVE LAYER ON THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A THIN-FILM BAW RESONATOR WITH A BRAGG REFLECTOR BASED ON MOLYBDENUM AND TITANIUM FILMS

Annotation. The results of a study of the influence of the FP-383 sensing layer and acetone vapor on the characteristics of a thin-film BAW resonator with a Mo-Ti Bragg reflector operating at approximately 4 GHz are presented. The deposition of the photoresist leads to a decrease in the resonant frequency and a change in the quality factor. Under exposure to acetone vapor, the series resonant frequency decreases by 2.81 MHz, the conductance decreases, while the quality factor and the effective electromechanical coupling coefficient increase.
***Keywords**:* BAW resonator, Bragg reflector, gas sensor.
***For citation**:* Zhilin N. M., Ulaeva T. N., Kuklev A. Yu., Chirikov N. A., Zonova Yu. S., Kuznetsov A. N. Study of the effect of immobilization of the sensitive layer on the electrical characteristics of a thin-film BAW resonator with a Bragg reflector based on molybdenum and titanium films// Radiophysics, photonics and research of the properties of matter : Abstracts of reports of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Контроль качества атмосферного воздуха и быстрое выявление утечек технологических газов являются ключевыми задачами промышленной безопасности и экологии. Для их решения нужны сенсорные системы с высокой чувствительностью, селективностью и стабильностью в самых разных условиях. При этом они должны быть совместимы с микроэлектронными технологиями и пригодны для массового производства. Тонкопленочные ОАВ-резонаторы чувствительны к малым изменениям массы и механических свойств поверхностного слоя, что позволяет использовать их в системах контроля состава газовой среды. Одним из распространенных конструктивных решений является ОАВ-резонатор с брэгговским отражателем, конструкция которого представлена на рисунке. Она обладает высокой механической прочностью, температурной стабильностью и слабой чувствительностью к внешним воздействиям. Целью данной работы является сравнительный анализ электрических и частотных характеристик тонкопленочных ОАВ-резонаторов с брэгговским отражателем на основе молибдена и титана до и после иммобилизации чувствительного слоя, а также при воздействии паров ацетона.



Конструкция микроэлектронного газового сенсора на основе ОАВ-резонатора:
1 – подложка, 2 – верхний электрод, 3 – пьезоэлектрический слой, 4 – нижний электрод,
5 – брэгговский отражатель, 6 – чувствительный материал

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы тонкопленочных ОАВ-резонаторов методом магнетронного распыления. Конструкция резонатора включала пьезоэлектрический преобразователь на основе пленки нитрида алюминия с алюминиевыми электродами и брэгговский отражатель, состоящий из шести пар чередующихся слоев молибдена и титана (Mo-Ti). Резонансная частота изготовленных образцов составляла около 4 ГГц. В качестве чувствительного слоя использовался позитивный фоторезист ФП-383, который может быть нанесен капельным методом и обладает чувствительностью к парам органических растворителей и газообразным веществам, в том числе ацетону, этанолу, аммиаку, формальдегиду, а также к водяным парам. При сорбции указанных веществ изменяются диэлектрические и механические свойства фоторезистивного слоя, что приводит к изменению резонансной частоты и добротности ОАВ-резонатора.

Фоторезист локально наносился капельным методом на поверхность верхнего электрода резонатора. После нанесения образец выдерживали в термошкафу при температуре 60 °C в течение 3 ч. Термическая обработка обеспечивала удаление остаточного растворителя, отверждение фоторезистивного слоя и улучшение его адгезии к поверхности резонатора. После термообработки образец выдерживали в нормальных условиях в течение 30 минут для стабилизации его параметров перед проведением измерений.

В эксперименте использовалось несколько образцов ОАВ-резонаторов с нанесен-

ным фоторезистивным слоем. Для оценки влияния ацетона на параметры ОАВ-резонатора сначала измеряли исходные электрические характеристики образцов до и после нанесения и сушки фоторезиста. Затем рядом с резонатором помещали фрагмент ткани, пропитанный ацетоном. Испарение ацетона обеспечивало взаимодействие его паров с фоторезистивным слоем, после чего фиксировали изменение частотных и электрических характеристик ОАВ-резонатора.

Измерения проводили в трех состояниях: до нанесения чувствительного слоя, после нанесения и сушки фоторезиста, а также при воздействии паров ацетона на фоторезистивный слой. При воздействии паров ацетона на фоторезистивный слой частота последовательного резонанса снизилась с 4,12781 до 4,12500 ГГц, то есть на 2,81 МГц. Частота параллельного резонанса снизилась на 0,93 МГц. При этом резонансный промежуток увеличился на 21,5 %. Эффективный коэффициент электромеханической связи также увеличился на 21,5 %. Это может свидетельствовать о частичном восстановлении электромеханической связи при взаимодействии фоторезиста с парами ацетона. Активная проводимость при воздействии ацетона снизилась на 27,5 %. Последовательный импеданс увеличился на 44,4 %. Добротность, напротив, выросла на 11,0 %. Полученные изменения свидетельствуют о влиянии сорбции паров ацетона на акустические и электрические характеристики резонаторной структуры. Одновременное увеличение добротности и эффективного коэффициента электромеханической связи при снижении активной проводимости может быть связано с изменением механических свойств чувствительного слоя и условий электрического согласования резонатора. Коэффициент отражения S_{11} после нанесения чувствительного слоя изменился с -8,91 до -2,74 дБ, а в среде ацетона составил -2,50 дБ. Провал по S_{11} стал менее выраженным, что указывает на ухудшение согласования и изменение входного импеданса резонатора. Статическая емкость изменилась с 7,041 до 7,2422 пФ после нанесения слоя и до 7,120 пФ в среде ацетона. Эти изменения невелики по сравнению с изменениями параметров динамической ветви, поэтому можно считать, что основной вклад чувствительного слоя проявляется не через изменение геометрической емкости, а через изменение акустико-механических свойств резонаторной структуры.

Установлено, что нанесение фоторезистивного слоя приводит к изменению электрических и частотных характеристик исследованных резонаторов. При воздействии паров ацетона наблюдается дополнительное смещение резонансных частот, снижение активной проводимости и изменение входного импеданса. При этом добротность увеличивается на 11 %, а эффективный коэффициент электромеханической связи – на 21,5 %. Полученные результаты подтверждают чувствительность ОАВ-резонатора к изменению состояния поверхностного фоторезистивного слоя и возможность его применения в качестве чувствительного элемента газового сенсора.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер регистрации проекта 124022500291-6).

В. С. Ковивчак[1,3], С. Н. Несов[2], А.Ю. Куклев[1,3]
[1]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научный центра СО РАН, Омск, Российская Федерация
[3]Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТОНКИХ ПЛЕНОК AlN, ПОЛУЧЕННЫХ РЕАКТИВНЫМ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ, И ЕГО МОДИФИКАЦИЯ МОЩНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Аннотация. Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и энергодисперсионного анализа исследован элементный и химический состав тонких пленок AlN, полученных методом магнетронного распыления для создания приборов СВЧ-диапазона. Показано, что данные по элементному составу полученные этими методами существенно отличаются. Обсуждены возможные причины изменения состава поверхностных слоев пленок при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности.
***Ключевые слова**:* пленки AlN , химический состав, модификация, мощный ионный пучок.
***Для цитирования**:* Ковивчак В. С., Несов С. Н., Куклев А. Ю. Химический состав тонких пленок AlN, полученных реактивным магнетронным распылением и его модификация мощным ионным пучком наносекундной длительности // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

V. S. Kovivchak[1,3], S. N. Nesov[2], A.Yu. Kuklev[1,3]
[1]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radio physics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific Center of the SB RAS, Omsk, Russian Federation
[3]Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

CHEMICAL COMPOSITION OF AlN THIN FILMS DEPOSITED BY REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING AND ITS MODIFICATION BY HIGH-POWER ION BEAM NANOSECOND DURATION

Annotation. The elemental and chemical composition of AlN thin films, deposited by magnetron sputtering for microwave device applications, was investigated using X-ray photoelectron spectroscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. It is shown that the elemental composition data obtained by these methods differ significantly. The possible causes for the changes in the composition of the film surface layers under the action of a high-power ion beam nanosecond duration are discussed.
***Keywords**:* AlN films, chemical composition, modification, high-power ion beam.
***For citation**:* Kovivchak V. S., Nesov S. N., Kuklev A. Yu. Chemical composition of AlN thin films deposited by reactive magnetron sputtering and its modification by high-power ion beam nanosecond duration // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Пленки AlN являются наиболее оптимальным материалом для изготовления СВЧ-резонаторов на объемных акустических волнах, благодаря своим высоким пьезоэлек-

трическим параметрам, высокой скорости звука и высокой теплопроводности. Получение пленок AlN методом магнетронного распыления на постоянном токе является экономически наиболее целесообразным. Несмотря на длительное использование такого способа нанесения пленок, состав получаемых пленок AlN все еще не достаточно исследован и не оценена возможность модификации пленок AlN с применением мощного ионного пучка (МИП) наносекундной длительности.

В работе для исследования элементного состава пленок использованы как энергодисперсионный анализ (ЭДА), так и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). По данным ЭДА состав исходной пленки (в ат. %): 48,74 N; 2,76 O; 48,14 Al; 0,36 Si. После однократного облучения МИП с плотностью тока 50 А/см^2 состав пленки изменился: 46,57 N; 3,49 O; 48,85 Al; 1,09 Si. Видно, что облучение приводит к небольшому снижению концентрации азота в пленке и увеличению концентрации кислорода. Толщина слоя, в котором определяется усредненный состав пленки этим методом, оценена в 1 мкм. Увеличение содержания кремния при облучении свидетельствует о некотором уменьшении толщины пленки при облучении, что, вероятно, связано с распылением и частичным испарением поверхностного слоя.

Состав поверхностных слоев исходной пленки на разных глубинах, полученный методом РФЭС при травлении пленки пучком Ar^+, следующий (ат. %). Поверхность: 20,1 N; 36,8 O; 26,5 Al; 16,6 C. На глубине ~ 15 нм состав изменился: 29,6 N; 28,2 O; 33,8 Al; 8,4 C. Для облученной МИП пленки на поверхности: 11,2 N; 45,4 O; 24,9 Al; 18,5 C. На глубине ~15 нм: 15,1 N; 45,0 O; 28,7 Al; 11,2 C. Видно, что по данным РФЭС поверхностные слои содержат на порядок больше кислорода и существенно меньше азота, по сравнению с данными ЭДА. Облучение МИП приводит к резкому снижению содержания азота и увеличению содержания кислорода в поверхностном слое. Анализ РФЭС спектров показал, что поверхностные слои исходных пленок наряду с нитридом алюминия содержат оксид алюминия и небольшое количество оксинитрида алюминия. Эти компоненты должны влиять на пьезоэлектрические параметры пленок нитрида алюминия. Облучение МИП приводит к уменьшению доли нитрида алюминия и увеличению доли оксида алюминия и оксинитрида алюмния.

Таким образом, для повышения качества пьезоэлектрических пленок нитрида алюминия, получаемых методом магнетронного распыления на постоянном токе, требуется оптимизация технологии, обеспечивающая снижение содержания кислорода в поверхностном слое. В тоже время мощный ионный пучок может быть использован для изменения пьезоэлектрических свойств пленок нитрида алюминия за счет изменения химического состава поверхностного слоя (увеличения доли оксида алюминия и оксинитрида алюминия).

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 124022500291-6).

С. С. Коломоец
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ВОЗДЕЙСТВИЕ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Аннотация. Анализируются одни из важных характеристик кварцевых резонаторов – резонансная частота и динамическое сопротивление. Существенное влияние на оптимизацию этих характеристик оказывает подбор марки токопроводящего клея и подходящего режима полимеризации клеевого соединения в конструкции резонаторов.
Ключевые слова: кварцевый резонатор, частота, сопротивление, токопроводящий клей
Для цитирования: Коломоец С. С. Воздействие клеевого соединения на электрические параметры кварцевых резонаторов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

S. S. Kolomoyets
[1]Omsk scientific research institute of instrument engineering (Omsk)

EFFECT OF ADHESIVE JOINT ON ELECTRICAL PARAMETERS OF QUARTZ RESONATORS

Annotation. This article analyzes key characteristics of quartz resonators—resonant frequency and dynamic resistance. Selecting the right adhesive grade and the appropriate curing mode for the adhesive bond in the resonator design significantly influences the optimization of these characteristics.
Keywords: quartz resonator, frequency, resistance, conductive adhesive
For citation: Kolomoyets S. S. Effect of adhesive joint on electrical parameters of quartz resonators// Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В настоящее время требования к параметрам и характеристикам кварцевых резонаторов входящих в состав кварцевых генераторов повышаются.

Огромное значение приобретают малые габаритные размеры, малое время выхода на частоту после подачи электропитания, рабочий температурный диапазон и самое главное относительный уход частоты в интервале рабочих температур.

Для повышения качества резонаторов возникают новые конструктивные решения и технологии. Одним из таких решений является использование клеевых соединений в конструкциях кварцевых резонаторов входящих в состав кварцевых генераторов. Среди различных видов клеев особую группу составляют токопроводящие клеи, которые обеспечивают одновременно механическое соединение и электрический контакт между элементами конструкции. Несмотря на то что использование токопроводящих клев в конструкции кварцевых резонаторов является устоявшейся тенденцией, влияние контактных соединений на основе данных клеев на характеристики кварцевых резонаторов изучено недостаточно.

В данной статье рассмотрено влияние старения на долговременную и температурную стабильности кварцевых резонаторов на основе токопроводящего клея, а именно:

резонансная частота, динамическое сопротивление. Для данного эксперимента было взято 3 токопроводящих клея: ТОК-2, А84-НМ, Н30-3-1.

Были собраны опытные образцы кварцевых резонаторов. Сборка кварцевого резонатора производилась путем приклейки пьезоэлемента к держателю токопроводящим клеем. Полимеризация клея проводилась в двух режимах на воздухе, согласно ТУ на клей. Режимы полимеризации для клея ТОК-2: 150 °С, 4 часа и 170 °С, 2 часа; для клея А84-НМ: 150 °С, 1 час и 120 °С, 2 часа; для клея Н30-3-1: 150 °С, 1 час и 120 °С, 2 часа.

На рис. 1 представлены графики изменения частоты в процессе термотренировок для выборочных образцов кварцевых резонаторов при разных режимах полимеризации клея для 3 типов клеев.

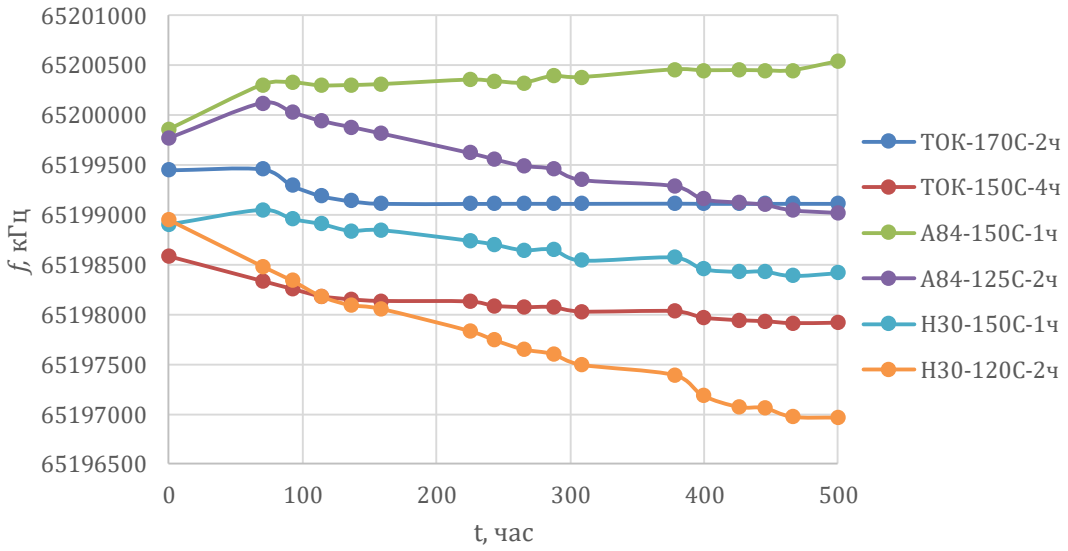


Рис. 1. *Зависимость изменения частоты КР от времени термоциклирования*

Из графиков можно увидеть, что при использовании клея ТОК-2 резонансная частота кварцевого резонатора при полимеризации клея при 170 °С после 100 часов отжига становится более стабильной и пологой, в то время как при температуре полимеризации клея 150°С стабильности не наблюдается.

Исследование клея А84-НМ и клея Н30-3-1 показывает, что резонансная частота становится более стабильной после 200 часов и 300 часов отжига соответственно, для всех режимов полимеризации клея. Исходя из этого, можно сделать вывод, при использовании клея ТОК-2 наиболее оптимальным режимом полимеризации клея является режим 170°С 2 часа, так как при данном режиме полимеризации можно добиться стабильных характеристик, по сравнению с клеями А84-НМ и Н30-3-1.

На рис. 2 представлены графики изменения в процессе термотренировок динамического сопротивления образцов кварцевых резонаторов при разных режимах полимеризации клея для 3 типов клеев.

Из графиков видно, что динамическое сопротивление у кварцевых резонаторов при использовании клея ТОК-2 варьируется в пределах 12-23 Ом, для клея А84-НМ в пределах 11-25 Ом, и для клея Н30-3-1 в пределах 10-60 Ом. Сравнивая динамические сопротивления кварцевых резонаторов, можно сказать, что более стабильные характеристики после 500 часов старения наблюдаются при использовании клея ТОК-2 для всех режимов сушки.

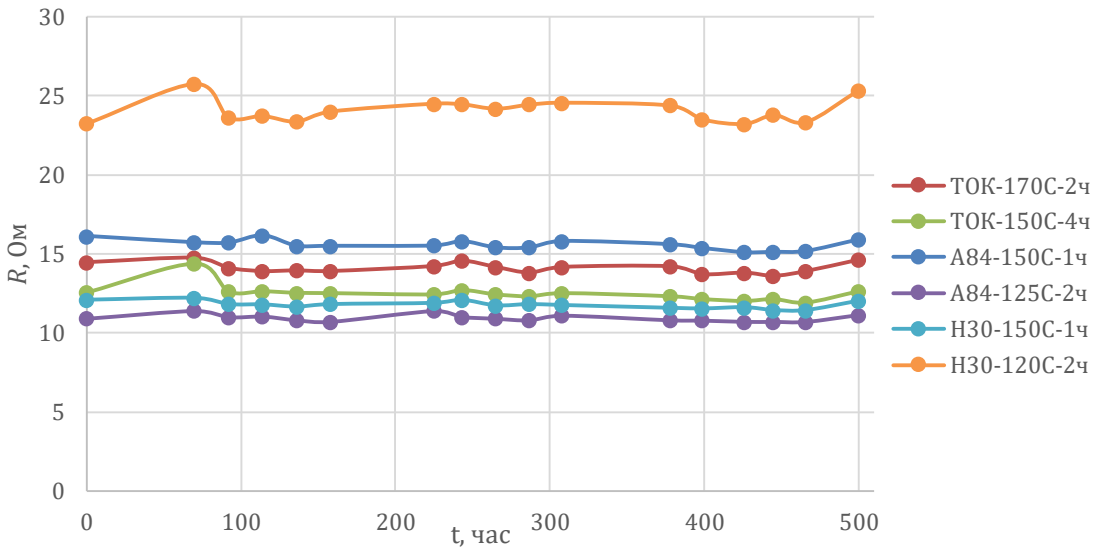


Рис. 2. *Зависимость изменения сопротивления КР от времени термоциклирования*

В заключение можно отметить, что при монтаже кварцевого резонатора с помощью токопроводящего клея важно определить режимы полимеризации клея. Также, использование токопроводящего клея ТОК-2 позволяет добиться более стабильных характеристик кварцевого резонатора, по сравнению с клеями А84-НМ и клея Н30-3-1. Дальнейшая работа предполагает изучение дополнительных типов клеев и особенности их взаимодействия с различными материалами контактной площадки, в частности золото, как наиболее часто применяющийся материал электродов в высокочастотных кварцевых резонаторах.

И. А. Корж, В. В. Вареник, Ю. С. Зонова
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ К ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ РАЗРЯДАМ

Аннотация. Приведены конструкция и параметры электрического воспламенителя с повышенной стойкостью к электростатическим разрядам (ЭСР). Воспламенитель устойчив к воздействию ЭСР до 25 кВ.
Ключевые слова: электрический воспламенитель, многослойная энергетическая пленка, стойкость к ЭСР.
Для цитирования: Корж И. А., Вареник В. В., Зонова Ю. С. Разработка и исследование характеристик энергетических воспламенителей с повышенной стойкостью к электростатическим разрядам // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6-8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

I. A. Korzh, V. V. Varenik, Yu. S. Zonova
Omsk Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

DEVELOPMENT AND STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF ENERGY IGNITERS WITH INCREASED RESISTANCE TO ELECTROSTATIC DISCHARGES

Annotation. The design and parameters of an electrical igniter with increased resistance to electrostatic discharges (ESD) are presented. The igniter is resistant to ESD up to 25 kV.
Keywords: electrical igniter, multilayer energy film, ESD resistance.
For citation: Korzh I. A., Varenik V. V., Zonova Yu. S. Development and study of the characteristics of energy igniters with increased resistance to electrostatic discharges // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Ранее нами в работе, опубликованной в тезисах докладов VIII Международной научно-технической конференции «Радиотехника, электроника и связь (Омск: ОНИИП, 2025. С. 280-282), были рассмотрены конструкции энергетических воспламенителей с защитой от электростатического электричества. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований электрического воспламенителя стойкого к электростатическим разрядам (ЭСР) на основе конструкции приведенной в патенте US5905226. В патенте US5905226 представлено устройство, которое содержит два змеевидных резистора, выполненных на теплопроводящей подложке, причем резисторы соединены между собой центральным мостовым элементом. Сопротивление мостового элемента намного ниже, чем у змеевидных резисторов, а отношение площади поверхности к объему у змеевидных резисторов значительно больше. На мостиковый элемент наносится слой циркония, который превращается при инициировании в плазму вместе с мостиковым элементом, чтобы воспламенить пиротехнический состав. Сопротивление мостикового элемента увеличивается с повышением температуры, в результате

чего мостиковый элемент получает больше энергии от подаваемого сигнала при повышении температуры. Резистивный мостик нечувствителен к связанной радиочастотной энергии и электростатическому разряду, поскольку большая часть энергии от этих паразитных сигналов направляется на змеевидные резисторы, а не на мостовой элемент. Сопротивление резистивного мостика составляло 0,3 Ом, а сопротивление змеевидных резисторов 10–20 Ом.

Недостатками конструкции воспламенителя по патенту US5905226 являются:

1) малая площадь слоя циркония, нанесенного на резистивный мостик и, следовательно, малая площадь соприкосновения пиротехнического состава со слоем циркония при его инициировании, что может привести к отказу, т.е. пиротехнический состав может не воспламениться при подрыве резистивного мостика;

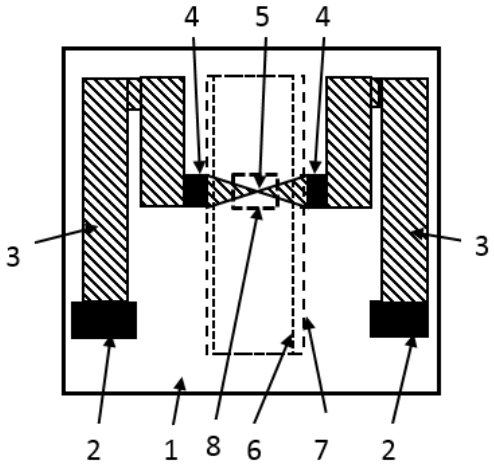
2) при инициировании мостика образуется малое количество вылетающих раскаленных частиц, необходимых также для воспламенения пиротехнического состава, из-за малой площади слоя циркония на мостике;

3) малая величина времени вспышки (единицы микросекунд), при этом пиротехнический состав не успеет воспламениться;

4) большая величина суммарного сопротивления змеевидных резисторов (10–20) Ом, что требует больших напряжений для инициирования воспламенителя. Необходимы сопротивления воспламенителя, включая сопротивление змеевидных резисторов и сопротивление резистивного мостика не более 4 Ом, тем самым повышается ток от источника питания с малым значением напряжения, необходимый для инициирования воспламенителя;

5) для инициирования резистивного мостика необходимо использовать пусковые конденсаторы с большой емкостью заряженные до больших напряжений. В патенте US5905226 используются конденсаторы емкостью 40 мкФ, заряженные до 22 В, или конденсаторы емкостью 480 мкФ, заряженные до 10 В. В ряде случаев неприемлемо (особенно в малогабаритных устройствах) использовать конденсаторы с большой емкостью, обладающих значительными габаритами.

Цель исследования – создание конструкции микроэлектронного тонкопленочного пиротехнического воспламенителя, нечувствительного к ЭСР в диапазоне от 10 до 25 кВ и обладающего большой площадью соприкосновения пиротехнического состава с поверхностью резистивного мостика, с использованием для инициирования воспламенителя малогабаритные конденсаторы с малой емкостью (до 20 мкФ), заряженные до 20 В, с суммарным сопротивлением, не превышающим 4 Ом. Также целью является увеличение количества и высоты выброса частиц материала мостика при его инициировании.



Конструкция электрического воспламенителя:
1 – диэлектрическая плата, 2 – контактные площадки, 3 – змеевидный резистор,
4 – контактные площадки резистивного мостика, 5 – резистивный мостик,
6 – СВС-пленка, 7 – теплоизоляционная пленка, 8 – отверстие в теплоизоляционной пленке

На рисунке приведена разработанная конструкция платы микроэлектронного тонкопленочного пиротехнического воспламенителя с резистивным мостиком и дополнительными змеевидными резисторами.

Следующие отличия в исследуемой конструкции микроэлектронного тонкопленочного воспламенителя, нечувствительного к ЭСР:

1) дополнительные змеевидные резисторы и резистивный мостик выполняются из одного и того же резистивного материала;

2) площадь соприкосновения поверхности резистивного мостика с пиротехническим составом в десятки раз больше, благодаря пленки с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), расположенной на поверхности резистивного мостика и имеющей большую площадь, чем площадь пленки циркония, нанесенной на резистивный мостик в патенте, тем самым увеличивается надежность инициирования пиротехнического состава, расположенного на поверхности резистивного мостика;

3) благодаря наличию на поверхности резистивного мостика СВС пленки, которая при воспламенении выделяет значительное количество тепла с температурой более 2000^{o}С, также увеличивается надежность инициирования пиротехнического состава. Кроме того, время горения СВС пленки составляет (0,5–1) мс, что позволяет прогреться пиротехническому составу в месте касания его с СВС пленкой. Это время в десятки раз превышает время вспышки резистивного мостика без СВС пленки.

Результаты экспериментов показали, что микроэлектронный тонкопленочный пиротехнический воспламенитель с конструкцией без змеевидных резисторов выдерживает ЭСР с напряжением до 10 кВ без деградации сопротивления мостика. Для стандартных значений ЭСР с напряжением до 25 кВ, необходимо ослабить напряжение на мостике не менее чем в 3 раза. Ослабление напряжения ЭСР на резистивном мостике при таких значениях сопротивления мостика и сопротивления змеевидных резисторов рассчитывается по формуле A=10log(R1/R2), где R1-сопротивление мостика, R2-суммарное сопротивление змеевидных резисторов и составит до минус 10 дБ. Сопротивление змеевидных резисторов свыше 4 Ом выполнять нецелесообразно, так как при этом увеличивается напряжение необходимое для инициирования воспламенителя, что в ряде случаев нецелесообразно.

Был изготовлен микроэлектронный тонкопленочный пиротехнический воспламенитель со следующими параметрами: размер платы 2х2 мм, резистивный мостик с длиной 45 мкм, шириной 65 мкм с сужением в середине в 30 мкм из пленки Та с сопротивлением 0,15 Ом; сопротивление змеевидного резистора в сумме из двух половинок составляло 1 Ом (ослабление по напряжению на мостике минус 8,2 дБ). На поверхности резистивного мостика располагалась СВС пленка с размерами 0,3х1,8 мм; площадь СВС пленки в десятки раз превышала площадь резистивного мостика, тем самым увеличивая площадь соприкосновения пленки с пиротехническим составом и надежность его воспламенения. Воспламенитель срабатывал от пускового конденсатора емкостью 20 мкФ, заряженного до напряжения 20В, а также от пускового конденсатора 1 мкФ, заряженного до напряжения 80 В. Такие конденсаторы имеет габариты не более 3,2х1,6х0,6 мм (типоразмер 1206), что позволяет изготавливать устройства инициирования с малыми габаритами.

И. А. Корж, Ю. С. Зонова
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОСПЛАМЕНИТЕЛЯ С НИЗКОЙ ЭНЕРГИЕЙ ЗАЖИГАНИЯ С МНОГОСЛОЙНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ

Аннотация. Приведена конструкция электрического воспламенителя с низкой энергией зажигания от пускового конденсатора емкостью 1 мкФ с использованием многослойной энергетической пленки Al/Ni и CuO/Al. Энергия зажигания составила 32 мкДж.
Ключевые слова: электрический воспламенитель, многослойная энергетическая пленка Al/Ni и CuO/Al, энергия зажигания.
***Для цитирования*:** Корж И. А., Зонова Ю. С. Разработка конструкции электрического воспламенителя с низкой энергией зажигания с многослойной энергетической пленкой // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

I. A. Korzh, Yu. S. Zonova
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

DEVELOPMENT OF A LOW-IGNITION ENERGY ELECTRIC IGNITOR DESIGN WITH A MULTILAYER ENERGY FILM

Abstract. This paper presents the design of an electric igniter with low ignition energy from a 1 μF starting capacitor using a multilayer Al/Ni and CuO/Al energy film. The ignition energy was 32 μJ.
Keywords: electric igniter, Al/Ni and CuO/Al multilayer energy film, ignition energy.
For citation: Korzh I. A., Zonova Yu. S. Development of a design of an electric igniter with low ignition energy and a multilayer energy film // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Электрические воспламенители широко используются в различных отраслях промышленности и для ряда применений необходим электрический воспламенитель с низкой рабочей энергией воспламенения (менее 200 мкДж).

Известны конструкции электрических воспламенителей, в которых для увеличения площади контактирования с пиротехническим материалом на резистивном мостике располагается многослойная энергетическая пленка, обладающая эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), площадь которой в десятки раз превышает площадь резистивного мостика.

На рис. 1 показана одна из таких конструкций электрического воспламенителя. Недостатком такой конструкции электрического воспламенителя – большая площадь СВС пленки (реактивных слоев) располагающейся на резистивном мостике. При вспышке резистивного мостика образующаяся температура распространяется по площади и объему СВС пленки, происходит отвод тепла на поверхность платы воспламенителя и в объем воспламенителя, что приводит к уменьшению температуры воздействующей на поверх-

ность СВС пленки, которая может не вспыхнуть. Так, например, для инициирования реакции СВС пленки типа Al/CuO необходимо получение температуры более 800 °С. Поэтому для инициирования резистивного мостика и получению более высокого значения температуры необходимо использовать пусковые конденсаторы с большой емкостью (как правило, 47 мкФ и более), заряженные до напряжения свыше 25 В.

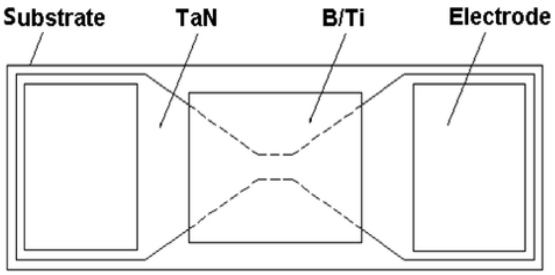
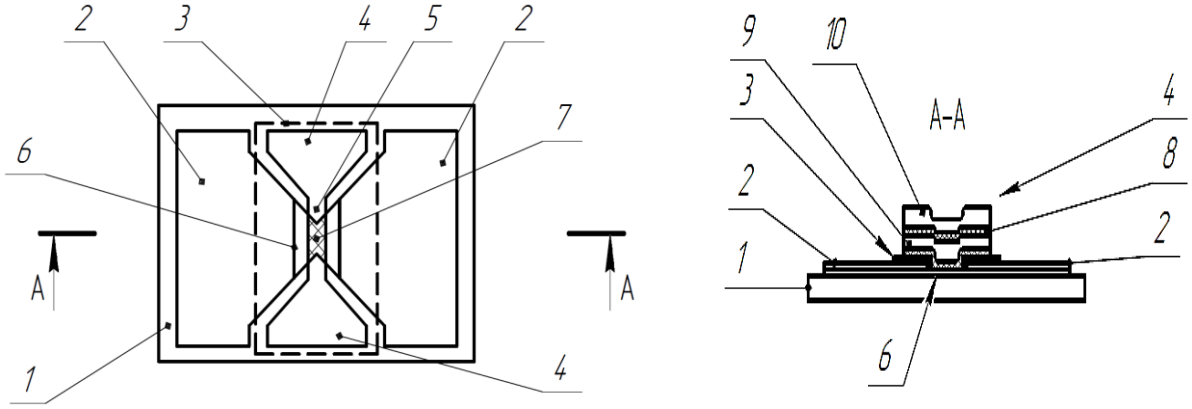


***Рис. 1**. Типичная конструкция электрического воспламенителя:*
Substrate – подложка, TaN – резистивный мостик из нитрида тантала,
B/Ti – СВС пленка, Electrode – контактные площадки

Цель работы – создание конструкции тонкопленочного электрического воспламенителя с низкой рабочей энергией воспламенения.

На рис. 2 приведена конструкция разработанного тонкопленочного электрического воспламенителя: *а* – вид сверху, б – разрез по линии А-А.



а ***б***

***Рис. 2**. Конструкция электрического воспламенителя с низкой энергией инициирования:*
1 – диэлектрическая плата, 2 – контактные площадки и металлизация, 3 – теплоизоляционная пленка, 4 – СВС пленка с большой площадью, 5 – полоска СВС пленки, 6 – резистивный мостик, 7 – окно в пленке 3, 8 – электроизоляционный слой, 9 – первая часть СВС пленки 3–5 мкм, 10 – вторая часть СВС пленки 5–10 мкм

На поверхности резистивного мостика формируется многослойная энергетическая СВС пленка типа Al/Ni, Al/Ti, Al/CuO и т.п. Эта пленка электрически изолируется от поверхности резистивного мостика тонким электроизоляционным слоем типа CuO, NiO, SiO_2 и т.п. При подаче на резистивный мостик напряжения (обычно от пускового конденсатора) происходит воспламенение мостика и выделяющееся тепло передается на поверхность СВС пленки и происходит ее вспышка. Чем больше толщина и площадь СВС пленки, нанесенной на поверхность резистивного мостика, тем большее количества тепла рассеивается в объеме СВС пленки и для ее инициирования требуется больше энергии от пускового конденсатора, подаваемой на резистивный мостик.

Было предложено уменьшить площадь и объем СВС пленки в месте ее контакта с поверхностью пленки резистивного мостика. СВС пленку, размещаемую на поверхности

резистивного мостика, выполняли не в виде прямоугольника, а в виде трех составных частей. Одна часть – СВС пленка в виде полоски шириной 100–150 мкм и длиной 200–300 мкм. Две другие части – области СВС пленки с большими размерами: по ширине и длине от 300 мкм и выше, размещаемые на концах СВС полоски. Первая часть – это СВС пленка Al/Ni толщиной 3–5 мкм. Вторая часть – это СВС пленка толщиной 5–10 мкм. Между частями располагается электроизоляционный слой NiO или CuO с толщиной 15–30 нм. Электроизоляционные слои NiO и CuO в сочетании с пленками Al также представляют собой СВС пленку и при СВС вспышке первого слоя Al/Ni они не будут препятствовать распространению СВС реакции и вспышке второй части СВС пленки. В то же время теплопроводность пленок NiO и CuO значительно ниже теплопроводности СВС пленки Al/Ni, тем самым уменьшается отвод тепла от вспыхнувшей первой части СВС пленки Al/Ni к второй части СВС пленки. Тем самым рабочая энергия инициирования тонкопленочного электрического воспламенителя будет ниже.

За счет уменьшения площади СВС пленки, контактирующей с поверхностью резистивного мостика, уменьшается рассеивание тепла от резистивного мостика при его инициировании в объем СВС пленки и потребуется меньше энергии от пускового конденсатора для зажигания СВС пленки. Достаточно инициировать узкую полоску СВС пленки, располагающуюся на поверхности резистивного мостика, чтобы в месте ее контакта с поверхностью резистивного мостика начиналась СВС реакция с выделением большого количества тепла и температуры (при реакции СВС пленки Al/Ni образуется температура 1300–1500^{o}C, для СВС пленки Al/CuO температура более 2000^{o}C). Эта температура и тепло распространяются по СВС полоске и зажигают большую площадь СВС пленки, примыкающей на концах к СВС полоске. За счет уменьшения площади и объема соприкосновения СВС пленки с поверхностью резистивного мостика уменьшается отвод тепла от резистивного мостика и тем самым уменьшается рабочая энергия необходимая для воспламенения СВС пленки.

Исследовались тонкопленочные электрические воспламенители, изготовленные в одном и том же технологическом цикле, но с разной площадью контактирования СВС пленки с поверхностью резистивного мостика. Использовалась одна и та же конфигурация резистивного мостика на основе пленок нитрида тантала с сопротивлением 8–8,5 Ом, на которой формировалась СВС область с разной шириной, располагаемой на мостике. Инициирование производилось от пусковых конденсаторов емкостью 1 мкФ. Диэлектрическая плата воспламенителя размером 2х2 мм с резистивным мостиком и СВС пленкой монтировалась на основании транзисторного корпуса КТ-1, на которой также располагались и другие элементы воспламенителя (см. рис. 2).

При большой площади СВС пленки (ширина пленки 600 мкм), располагающейся на резистивном мостике воспламенитель вспыхивал при напряжении 12 В от пускового конденсатора емкостью 1 мкФ. Энергия воспламенения (инициирования), рассчитанная по формуле $E=U^2C/2$ составила 72 мкДж. При маленькой площади СВС пленки – полоска шириной 100 мкм, располагающийся на резистивном мостике воспламенитель вспыхивал при напряжении 8 В. Энергия воспламенения (инициирования) составила 32 мкДж.

Отсюда следует, что разработанная конструкция тонкопленочного электрического воспламенителя позволяет снизить энергию воспламенения не менее чем в 2 раза. Энергия воспламенения в предложенной конструкции тонкопленочного электрического воспламенителя также не менее чем в 2 раза ниже энергии воспламенения представленной в патенте US6640718B2 (100–200 мкДж) и сопоставима с данными патента CN103499253B (74 мкДж).

И. А. Корж[1], А. Ю. Куклев[1,2,3]
[1]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация
[3]Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЬ С ПИРОТЕХНИЧЕСКИМ СОСТАВОМ

Аннотация. Представлены результаты по определению скорости инициации различных пиротехнических составов в конструкции энергетического воспламенителя на основе энергетической СВС-пленки. Показано, что механическая активация порошков пиротехнического состава приводит к увеличению скорости его возгорания от 1500–2200 до 500–600 мкс.
Ключевые слова*:* скорость реакции, механическая активация, СВС фольга, тонкие пленки, энергетический воспламенитель.
Для цитирования*:* Корж И. А., Куклев А. Ю. Энергетический воспламенить с пиротехническим составом // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

I. A. Korzh[1], A. Yu. Kuklev[1,2,3]
[1]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radio physics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation
[3]Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

ENERGY IGNITOR WITH PYROTECHNICAL COMPOSITION

Annotation. This paper presents results on determining the ignition velocity of various pyrotechnic compositions in a high-energy igniter based on SHS film. It is shown that mechanical activation of pyrotechnic powders increases the ignition velocity from 1500–2200 μs to 500–600 μs.
Keywords*:* reaction rate, mechanical activation, SHS foil, thin films, high-energy igniter.
For citation*:* Korzh I. A., Kuklev A. Yu. Energy ignitor with pyrotechnical composition // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Энергетические пиротехнические воспламенители в настоящее время получили широкое распространение за счет их применения в системах автомобильной безопасности, пожаротушения, проведения горно-добываемых работ полезных ископаемых, а также других областях. Такие воспламенители конструктивно состоят из корпуса с двумя выводами, на который вмонтирована плата с энергетической пленкой и контактными площадками, соединенными с выводами корпуса проволочными контактами. На плате путем магнетронного осаждения и фотолитографии последовательно формируются резистивный мостик, контактные площадки и многослойная энергетическая пленка на основе чередующихся пар слоёв Ni/Al, Ti/Al, CuO/Al, MoO_3/Al и т.д. К основа-

нию корпуса приваривается колпачок определённого объема, который может быть заполнен в том числе пиротехническим составом, не относящимся к взрывчатым веществам. При подаче на резистивный мостик напряжения от источника тока или от пускового конденсатора, происходит подрыв мостика и инициирование пиротехнического состава (заполненного в колпачок воспламенителя), контактирующего с поверхностью энергетической пленки.

На рис. 1 приведена типичная конструкция электрического воспламенителя.

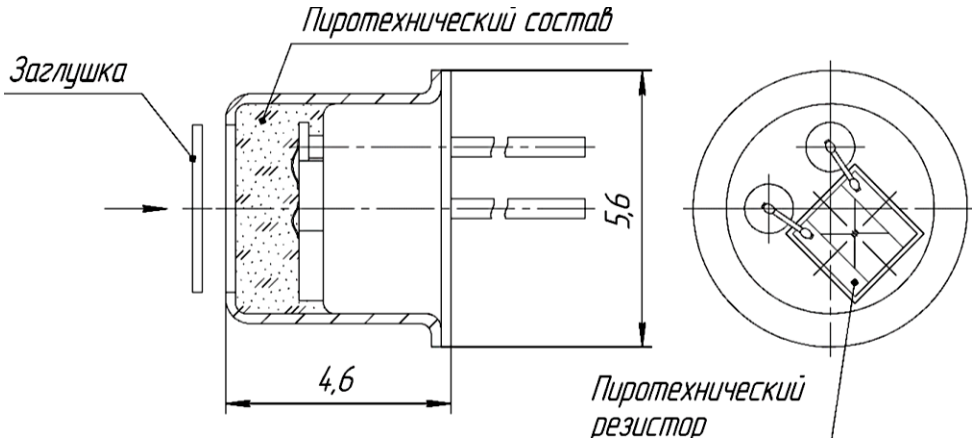


***Рис. 1**. Конструкция электрического воспламенителя на основе транзисторного корпуса КТ-1*

В некоторых случаях требования заказчика могут предъявляться к скорости инициирования такого пиротехнического состава, которая обычно составляет порядка 500–2000 мкс. Приемлемой считается скорость не более 1000 мкс. Поэтому актуальной научно-технической задачей является поиск составов, подходящих по скорости начала инициирования и энерговыделению, а также поиск способов увеличения скорости начала реакции.

Целью работы является увеличение скорости начала реакции инициирования пиротехнического состава заполненного в колпачок энергетического воспламенителя (с момента подачи на него электрического импульса,) путем механической активации смесей порошков различных пиротехнических составов.

Наиболее распространенными смесями порошков являются термитные составы типа $KClO_4$/Al, CuO/Al и CuO/Ti. Первоначально исследовалась смесь промышленного термита для сварки рельс, на основе порошка CuO/Al (с добавкой порошка меди до 20%). Скорость начала инициирования состава определялась при помощи осциллографа, к входным каналам которого был подключен фоточувствительный датчик для определения начала вспышки света и датчик реагирующий на ток протекающий в цепи. Пиротехнический состав запрессовывался в объем корпуса при помощи пуансона и добавки этилового спирта, после чего подвергался сушке при 90 ºС в течение 30 минут.

На рис. 2 приведена осциллограмма по току инициирования состава на основе порошка CuO/Al. Из рис. 2 следует, что величина импульса тока составила порядка 70 А, а время вспышки от начала подачи тока составило порядка 2200 мкс. Такая длительная скорость инициирования объясняется крупным размером гранул порошка (более 100 мкм), которые долго нагреваются от тепла (порядка 1500 ºС), полученного от энергетической пленки воспламенителя, а также добавкой порошка меди, увеличивающего длительность реакции.

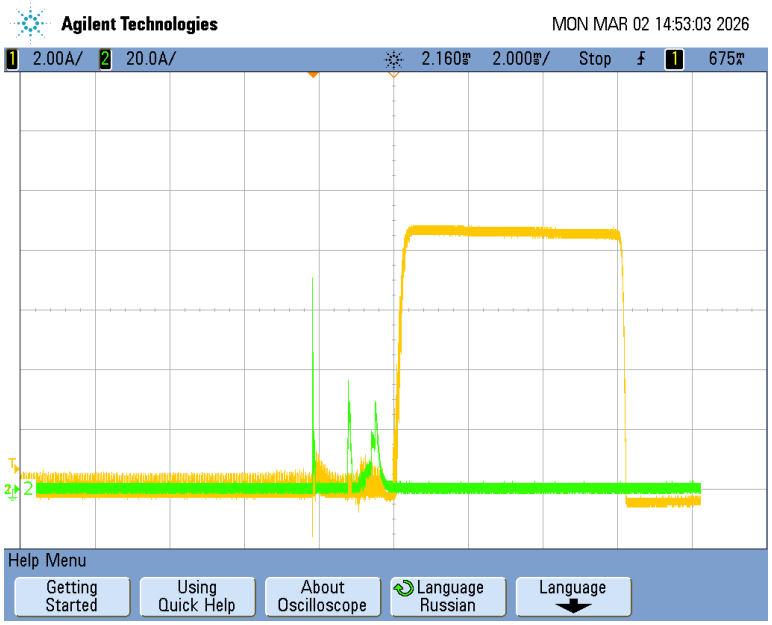


***Рис. 2**. Осциллограмма по току инициирования состава на основе порошка CuO/Al: зеленая линия – импульс тока, желтая – импульс света*

По литературным данным наиболее оптимальными составами являются смеси порошков: KClO4/Al с теплотой реакции 7,5–8,3 МДж/кг, CuO/Al с теплотой реакции 3,8–4,0 МДж/кг и CuO/Ti с теплотой реакции 2,9–3,1 МДж/кг. Навески перечисленных составов определенной стехиометрии были получены методом перемешивания в лабораторной центрифуге в течении одного часа, при скорости 800 об/мин. Скорость инициирования по-прежнему находилась в диапазоне от 1800–2200 мкс, что связано с плохим качеством перемешивания и крупнодисперсностью исходных компонентов порошков.

Увеличения скорости начала реакции можно достичь путем измельчения состава методом механической активации, а также соблюдения оптимальной стехиометрии состава. Для механической активации состава была разработана специальная оснастка в виде стакана с герметично закрывающейся крышкой, выполненная из алюминия. В оснастку помещалась смесь вышеперечисленных порошков (20 г) при соблюдении стехиометрии по массе состава, а также стальные шары различного диаметра, превосходящие в 5 раз массу порошка (100 г). Порошки предварительно просеивались через сито с размером ячеек 60 мкм. Для улучшения перемешивания добавляли этиловый спирт (20 г), который высыхал после просушивания состава при комнатной температуре в течение суток. Оснастка помещалась в лабораторную центрифугу, таким образом достигался принцип «планетарной мельницы». Перемешивание осуществлялось в течении одного часа, при скорости 900 об/мин. Полученные навески составов заполнялись в колпачок воспламенителя в виде суспензии с этиловым спиртом, с последующей сушкой.

После механической активации состава на основе CuO/Al скорость начала инициирования уменьшилась с 2200 до 500–600 мкс. Таким образом, можно сделать вывод об эффективности описанного способа перемешивания состава.

И. А. Корж, Н. А. Чириков, В. В. Вареник, Ю. С. Зонова
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЬ С БОЛЬШОЙ ВЕЛИЧИНОЙ БЕЗОПАСНОГО ТОКА И НИЗКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ ИНИЦИИРОВАНИЯ

Аннотация. Приведена конструкция электрического воспламенителя с большой величиной безопасного тока- 2А в течение не менее 5 минут многократно и током срабатывания 8–10 А. Напряжение инициирования не более 2,5 В.
Ключевые слова: электрический воспламенитель, многослойная энергетическая пленка, безопасный ток, напряжение инициирования.
Для цитирования: Корж И. А., Чириков Н. А., Вареник В. В., Зонова Ю. С. Электрический воспламенитель с большой величиной безопасного тока и низким напряжением инициирования// Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества: тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

I. A. Korzh, N. A. Chirikov, V. V. Varenik, Yu. S. Zonova
Omsk Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

ELECTRIC IGNITOR WITH HIGH SAFETY CURRENT AND LOW INITIATION VOLTAGE

Abstract. The design of an electric igniter with a high safety current of 2 A for at least 5 minutes and a trigger current of 8–10 A is presented. The initiation voltage is no more than 2,5 V.
Keywords: electric igniter, multilayer energy film, safe current, initiation voltage.
For citation: Korzh I. A., Chirikov N. A., Varenik V. V., Zonova Yu. S. Electric igniter with a high safe current and low initiation voltage // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Электрические воспламенители относятся к области устройств воспламенения энергетических материалов и могут быть использованы для приведения в действие различных пиротехнических зарядов, например, в горнодобывающей промышленности.

Для ряда применений необходим электрический воспламенитель с большой величиной безопасного тока, обычно до 2 А с временем воздействия безопасного тока в течении не менее 5 минут; с током срабатывания 8–10 А; с временем срабатывания не более 10 мс; с низким напряжением инициирования, обычно до 2–2,5 В.

Типичные микроэлектронные электрические воспламенители имеют безопасный ток не превышающий 0,2 А, в некоторых конструкциях до 0,5 А. Известна конструкция электрического воспламенителя с низким напряжением инициирования, состоящая из платы – подложки из кремния с покрытой пленкой двуокиси кремния, на которой располагается сформированная область из многослойной реакционной энергетической пленки Ni/Al, обладающей эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), с толщиной от 10 мкм. Пленка двуокиси кремния препятствует отводу тепла к подложке, так как обладает низкой теплопроводностью. К сформированной области из многослойной реакционной энергетической пленки Ni/Al с эффектом СВС подходит полоска из СВС пленки Ni/Al, к которой присоединяются контакты. На полоски из Ni/Al подается напряжение 1,5 В. При пропускании тока полоска вспыхивает и

инициирует реакцию области с Ni/Al пленкой. Под действием электрического тока инициируется экзотермическая реакция в области проводника-полоски, расположенной между контактными площадками. При этом экзотермическая реакция распространяется по отводу к большой области (площадке), состоящей из многослойной энергетической пленки.

Достоинство такой конструкции-для инициирования СВС-реакции требуется низкий уровень подводимого напряжения, в данном случае 1,5 В. Недостатки такой конструкции: низкий уровень безопасного тока, так как узкая СВС полоска не способна длительно удерживать большие величины тока до 2А; возможно затухание СВС реакции по отводу к площадке из СВС пленки с большой площадью из-за поглощения выделяющейся теплоты материалом подложки (длинный путь распространения СВС реакции).

Было предложено для увеличения безопасного тока параллельно резистивному мостику к контактным площадкам приваривать перемычку из медной проволочки. Электрический воспламенитель был разработан на основе транзисторного корпуса КТ-1-4. На рис. 1 показана электрическая схема соединений элементов разработанного электрического воспламенителя.

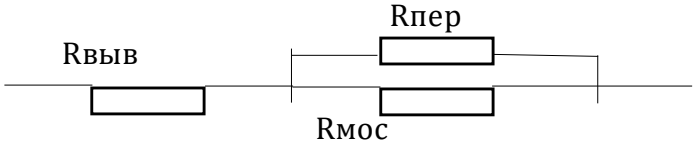


***Рис. 1**. Схема соединений элементов электрического воспламенителя:*
Rвыв – сопротивление подводящих проводников (до 0,24 Ом),
Rпер – сопротивление проволочной перемычки (0,015–0,016 Ом),
Rмос – сопротивление резистивного мостика (0,4–0,6 Ом)

При пропускании безопасного тока 2 А большая часть выделяемой мощности рассеивается на проволочной перемычке и подводящих проводниках. Сопротивления мостика и перемычки выбираются таким образом чтобы при пропускании тока через резистивный мостик не происходило изменение его сопротивления и при пропускании тока через проволочные перемычки также не происходило изменения сопротивления этих перемычек. Как показали результаты экспериментов, проволочная медная перемычка с диаметром 50 мкм длительно выдерживает безопасный ток до 2 А и перегорает при токе 4–5 А. Проволочная перемычка с меньшим диаметром, например равным 30 мкм, при токе в 2 А перегорает. Расстояние между центрами штырькоых выводов на основании корпуса КТ-1-4 составляет 1,8 мм. Сопротивление пролочной перемычки из медной проволочки диаметром 50 мкм, прикрепленой методом сварки к штырьковым выводам, составляет 0,015–0,016 Ом. При пропускании тока выделяющееся тепло на перемычке рассеивается в окружающей среде и не попадает на поверхность платы и поверхноссть резистивного мостика, тем самым сниждается их нежелательный нагрев.

На рис. 2 показана конструкция электрического воспламенителя: *а* – вид сбоку, *б* – вид сверху. К основанию корпуса, где располагается плата воспламенителя (размер платы 2х2 мм), присоединяется колпачок для размещения пиротехнического состава (на рис. 2 не показан). При перегорании проволочной перемычки (ток 4–5 А), ток шедший через параллельно соединенные перемычку и резистивный мостик, проходит через резистивный мостик, который при токе 3 А гарантировано взрывается (вспыхивает).

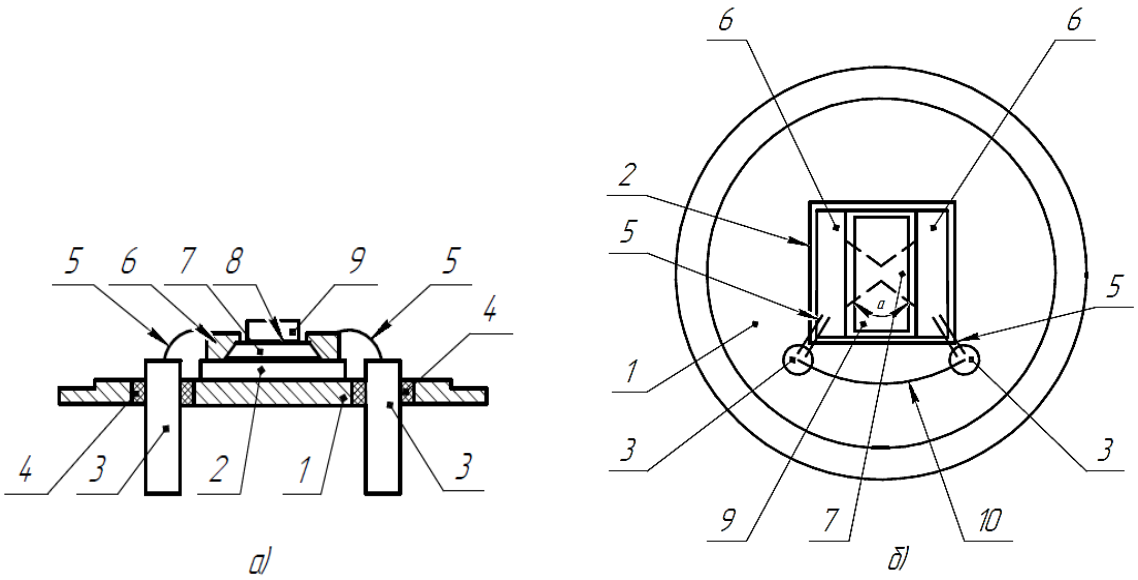


***Рис. 2**. Конструкция электрического воспламенителя:*
1 – основание корпуса КТ-1-4, 2 – диэлектрическая плата воспламенителя,
3 – штырьковые выводы, 4 – изоляторы выводов, 5 – соединительные проводники,
6 – контактные площадки, 7 – резистивный мостик,
8 – изолирующая пленка NiO или CuO, 9 – СВС пленка с большой площадью,
10 – проволочная перемычка, располагаемая между шырьковыми выводами 3.

Величина напряжения U, прикладываемого к воспламенителю для тока срабатывания 8–10 А определяется по формуле U=(8-10)Rвоспл. Сопротивление воспламенителя Rвоспл равно сумме последовательно соединенных выводов с сопротивлением Rвыв с параллельно соединенными перемычкой с сопротивлением Rпер и резистивным мостиком с сопротивлением Rмост и определяется по формуле Rвоспл.=Rвыв+R. Сопротивление R, параллельно соединенных резисторов Rпер и Rмост, рассчитывается по формуле R=Rпер•Rмост/(Rпер+Rмост). Для сопротивления мостика от 0,4 Ом до 0,6 Ом – это сопротивление равно R~ 0,015 Ом. Отсюда сопротивление воспламенителя Rвоспл = 0,24+0,015=0,255 Ом и U=2-2,5 В.

При безопасном токе I=2 А выделяемая мощность P на сопротивлении Rвоспл=0,255 Ом электрического воспламенителя составит P=I2R=22•0,255~ 1 Вт. При этом на сопротивлении выводов Rвыв=0,24 Ом будет выделяться мощность P=I2Rвыв=22•0,24= 0,96 Вт. На резистивном мостике с параллельно подсоединеной проволочной перемычкой будет выделяться мощность 1–0,96=0,04 Вт. При безопасном токе 2 А будут нагреваться выводы и резистивный мостик. Часть тепла от нагрева выводов будет передаваться на резистивный мостик. Результаты экспериментов показали, что температура поверхности диэлектрической платы, на которой смонтирован резистивный мостик, при выдержке в течении 5 минут, не превышала 120°С, что не приводило к деградации сопротивления резистивного мостика. Также решена задача создания конструкции воспламенителя с большой площадью контактирования резистивного мостика с пиротехническим составом. Типичные размеры резистивного мостика 0,1х0,2 мм (0,02 кв. мм), а размеры СВС пленки на резистивном мостике 0,8х1,6 мм (128 кв. мм). Тем самым увеличивается надежность воспламенения пиротехнического состава за счет увеличения площади контактирования. При этом умньшается время срабатывания пиротехнического состава, которое находилось в пределах 4–6 мс, что меньше значения 10 мс, предъявляемого к электрическому воспламенителю. Воспламенитель выдерживал безопасный ток 2 А в течение 5 минут и срабатывал при токе 8–10 А, что соответствовало предъявляемым требованиям.

С. А. Кузнецова, М. В. Батищева, В. И. Анисимова
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КЕРАМИКИ

Аннотация. Проведен обзор полимерных материалов, нестандартное применение которых позволит расширить производственные возможности технологии низкотемпературной керамики.
Ключевые слова*:* низкотемпературная керамика*,* майлар, жертвенный слой, ABS пластик.
Для цитирования*:* Кузнецова С. А., Батищева М. В., Анисимова В. И. Применение современных полимерных материалов в производстве изделий низкотемпературной керамики // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

S. A. Kuznetsova, M. V. Batishcheva, V. I. Anisimova
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

THE USE OF MODERN POLYMER MATERIALSIN THE PRODUCTION OF LOW-TEMPERATURE CERAMIC PRODUCTS

Annotation. In paper provides an overview of polymer materials whose unconventional application will expand the production capabilities of low-temperature ceramic technology.
Keywords*:* low temperature ceramics, mylar, sacrificial layer, ABS plastic.
For citation*:* Kuznetsova S. A., Batishcheva M. V., Anysymova V. I. The use of modern polymer materials in the production of low-temperature ceramic products // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В основе технологии низкотемпературной керамики заложена технология производства многослойных плат на керамической основе из отдельных листов одинакового размера, на которых предварительно сформированы переходные отверстия и топология, элементы полостей и окон. Всего существует 3 размера керамических листов (5, 6 и 8 дюймов). Таким образом, все оборудование (установки перфорации, печати, сборки листов в стек) и оснастка к нему предполагают, что все технологические операции до прессования проводятся на керамических листах. Оборудование и оснастка не предусматривает проведение печати топологии или разметки на отдельных уже разрезанных и спеченных керамических платах. Однако, введение в производственный цикл новых материалов и способов их использования, позволит расширить номенклатуру изделий, производимых по технологии низкотемпературной керамики.

Майлар (Mylar) – это торговая марка полиэстеровой пленки, которая в технологии низкотемпературной керамики используется как временная несущая основа для керамических слоев. Майлар служит жесткой и прочной подложкой, которая не дает листу керамики крошиться или деформироваться при формировании отверстий пуансоном. Процесс перфорации листов керамики происходит со стороны майлара. Важно отметить, что процесс заполнения переходных отверстий происходит также со стороны майлара. Таким образом, майлар – важный технологический инструмент, который делает

процесс производства керамических плат более точным и эффективным.

Но этими стадиями производства керамических плат с использованием майлара ограничиваться не следует. Использование майлара следует рассмотреть, как самостоятельного материала. Его можно использовать в качестве трафарета при печати глазурями или пастами с повышенной вязкостью, или в случае, когда обычный сетчатый трафарет задействовать нет возможности или нецелесообразно. Сформировать отверстия для печати можно на установке перфорации. Использование майлара в этом качестве позволяет с экономить время и материал для производства сетчатого трафарета, также его использование весьма актуально при выполнении нестандартных производственных задач, например, формирование маски для машинной пайки из глазури на уже спеченных керамических платах, нанесение разметки для резки после спекания, в случае изменения геометрических параметров в процессе спекания LTCC-заготовок.

Жертвенный слой. Жертвенный слой в технологии низкотемпературной совместно спекаемой керамики – это специальный материал, который используется на промежуточных этапах производства. В исходном состоянии жертвенный слой представляет собой «сырую» LTCC керамику. Отличие от основной керамики состоит в том, что при температурах обжига LTCC он не спекается, а только выгорает органическая составляющая, превращаясь в порошковую пленку. При этом эта сама пленка не дает усадки, но точно сцепляется с поверхностью LTCC-заготовки. После обжига порошковая пленка легко разрушается и смывается водой, дополнительно можно использовать ультразвуковую ванну. Жертвенный слой стабилизирует усадку основной керамики по осям X и Y, обеспечивая более точное позиционирование элементов. Таким образом, использование жертвенного слоя при обжиге помогает улучшить качество и точность изготовления изделий из LTCC, но при этом не влияет на свойства конечного продукта.

Однако, если перевести материал жертвенного слоя в пастообразное состояние, то его можно использовать на стадии заполнении переходных отверстий или трафаретной печати. Использование пасты со свойствами жертвенного слоя позволяет формировать элементы полостей и сквозных отверстий в керамических платах, а также минимизировать с ее помощью изменение геометрической формы платы при обжиге, особенно это важно для керамических плат сложных форм. Применение жертвенного слоя в виде пасты дает ряд преимуществ при сборке и прессовании LTCC-заготовки, в отличие от случаев, когда данная паста не используется. Сборка и прессование сплошных (без полых элементов), заполненных листов «сырой» LTCC керамики обеспечивает минимальный отход в брак плат после спекания по причине залома или искривления стенок отверстий или полостей.

В качестве жидкой составляющей могут использоваться органические связующие, которые используются в составе проводящих паст. Группа компонентов, обеспечивающая получение пастообразной массы, удобной для нанесения трафаретной печатью, представляет собой: связующие вещества (терпинеол, этилцеллюлоза), пластификаторы (дибутилфталат), растворители (толуол, ацетон, N-бутилацетат для достижения нужной вязкости). При выборе компонентов критически важно, чтобы усадка и коэффициент теплового расширения были согласованы с параметрами используемой керамики. За основу необходимо взять параметры проводящей пасты (вязкость, связующее, пластификатор), вся информация предоставляется в технических условиях производства пасты и паспорте на нее.

ABS-пластик. Одним из способов, с помощью которого можно расширить возможности технологии низкотемпературной керамики, является разработка технологической оснастки для установки печати.

Одним из материалов, из которого возможно производство оснастки нестандартных форм и размеров, является ABS пластик. ABS пластик – ударопрочный термопла-

стичный полимер, который благодаря сочетанию трех мономеров обладает уникальным набором свойств. Одним из важнейших преимуществ этого материала является его универсальность в обработке. ABS-пластик легко поддается различным методам механической обработки (сверлению, фрезеровке, шлифовке). Это позволяет создавать детали сложной формы с высокой точностью. Также чтобы придать этому виду пластика необходимую форму, можно его нагреть. Рабочая температура ABS-пластика для термоформования составляет 100–170°C.

Самым распространенный способом использования данного вида пластика является его применение в 3D печати. Однако, в данный момент ABS-пластик представлен в виде листов различной толщины (0,5…5 мм), что значительно расширяет возможности его применения.

Несмотря на существенные недостатки (выделение токсичных газов при нагреве, низкая устойчивость к УФ-излучению, гигроскопичность), использование данного материала для макетирования технологической оснастки позволяет значительно расширить перечень технологических операций с уже спеченными керамическими платами (печать маски для машинной пайки из глазури). Примером такого использования может служить вкладка на печатный стол под размер уже готовых керамических плат. Также из ABS-пластика могут быть выполнены лицевые панели сортеров для отбраковки по геометрическим размерам готовых керамических плат.

Таким образом, возможность нестандартного использования и комбинирования различных материалов позволяет пересмотреть подход к технологии низкотемпературной керамики и выполнять нестандартные производственные задачи, что позволит значительно расширить номенклатуру производимых изделий.

А. Ю. Куклев[1,2,3], Л. В. Баранова[1,3], Н. А. Давлеткильдеев[1,2,3]
В. И. Струнин[1,2,3], Н. А. Чириков[1,2]
[1]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[3]Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СКАНДИЯ НА СВОЙСТВА ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

Аннотация. Представлены результаты микроскопических исследований пленок нитрида алюминия-скандия полученных методом вакуумного магнетронного осаждения, в зависимости от концентрации скандия в объеме пленки. Описана методика получения пленок нитрида алюминия-скандия путем размещения навесок из скандия на алюминиевую мишень. Показано, что при увеличении концентрации скандия от 4% до 20% среднеквадратичная шероховатость поверхности пленок снижается от 0,91 нм до 0,55 нм, а значение показателя преломления находятся в диапазоне от 2,13 до 2,23.
Ключевые слова*:* атомно-силовая микроскопия, магнетронное осаждение, нитрид алюминия, показатель преломления, тонкие пленки.
Для цитирования*:* Куклев А. Ю., Баранова Л. В., Давлеткильдеев Н. А., Струнин В. И., Чириков Н. А. Effect of scandium concentration on the properties of aluminum nitride films // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. Yu. Kuklev[1,2,3], L. V. Baranova[1,3], N. A. Davletkildeev[1,2,3]
V. I. Strunin[1,2,3], N. A. Chirikov[1,2]
[1]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radio physics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[3]Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

EFFECT OF SCANDIUM CONCENTRATION ON THE PROPERTIES OF ALUMINUM NITRIDE FILMS

Annotation. The results of microscopic studies of aluminum-scandium nitride films obtained by vacuum magnetron deposition are presented, depending on the scandium concentration in the film bulk. A method for producing aluminum-scandium nitride films by placing scandium samples on an aluminum target is described. It is shown that with an increase in scandium concentration from 4% to 20%, the root-mean-square surface roughness of the films decreases from 0,91 nm to 0,55 nm, and the refractive index increases from 2,13 to 2,23.
Keywords*:* atomic force microscopy, magnetron deposition, aluminum nitride, refractive index, thin films.
For citation*:* Kuklev A. Yu., Baranova L. V., Davletkildeev N. A., Strunin V. I., Chirikov N. A. Effect of scandium concentration on the properties of aluminum nitride films// Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В настоящее время актуальной научно-технической задачей является разработка и получение тонкопленочных микроэлектронных резонаторов на объемных акустических волнах. Данные устройства могут быть использованы для создания фильтров сверхвысокочастотного диапазона, применяющихся в системах беспроводной связи. Основными характеристиками резонаторов являются рабочая частота, определяемая толщиной пьезоэлектрической пленки электроакустического преобразователя, а также добротность, зависящая от качества получаемой пленки, в частности от таких параметров как шероховатость поверхности, показатель преломления, фазовый и стехиометрический состав.

В последнее время в российских и зарубежных изданиях были опубликованы работы, в которых говорится об увеличении добротности резонаторов различных типов, путем легирования нитрида алюминия скандием (или иттрием) путем одновременного распыления мишеней алюминия и скандия (иттрия) в атмосфере аргона и азота.

Целью данной работы является исследование физических свойств пленок нитрида алюминия-скандия в зависимости от концентрации скандия, для их использования в структуре резонаторов на объёмных акустических волнах в диапазоне от 1 ГГц до 20 ГГц.

Пленки нитрида алюминия-скандия были получены методом вакуумного магнетронного осаждения. На мишень алюминия равномерно размещались навески из скандия (толщиной 0,1 мм) различной площади. Концентрация скандия в данном случае определяется отношением площади навесок из скандия, к площади эрозии алюминиевой мишени. Формирование пленок осуществлялось в реактивной атмосфере аргона и азота, при давлении в вакуумной камере – 0,1 Па и температуре подложки – 300 ºС. Таким образом на кремниевых пластинах (20х16 мм) были сформированы образцы пленок нитрида алюминия-скандия с концентрацией скандия от 4% до 20%.

Исследование шероховатости поверхности пленок осуществлялось методом атомно-силовой микроскопии. Показатель преломления определялся методом спектральной эллипсометрии на АСЭБ-10М, а также методом оптической интерферометрии на МИИ-4. Полученные результаты говорят об уменьшении среднеквадратичной шероховатости поверхности пленок нитрида алюминия-скандия на кремниевых подложках при увеличении концентрации скандия (рис. 1).

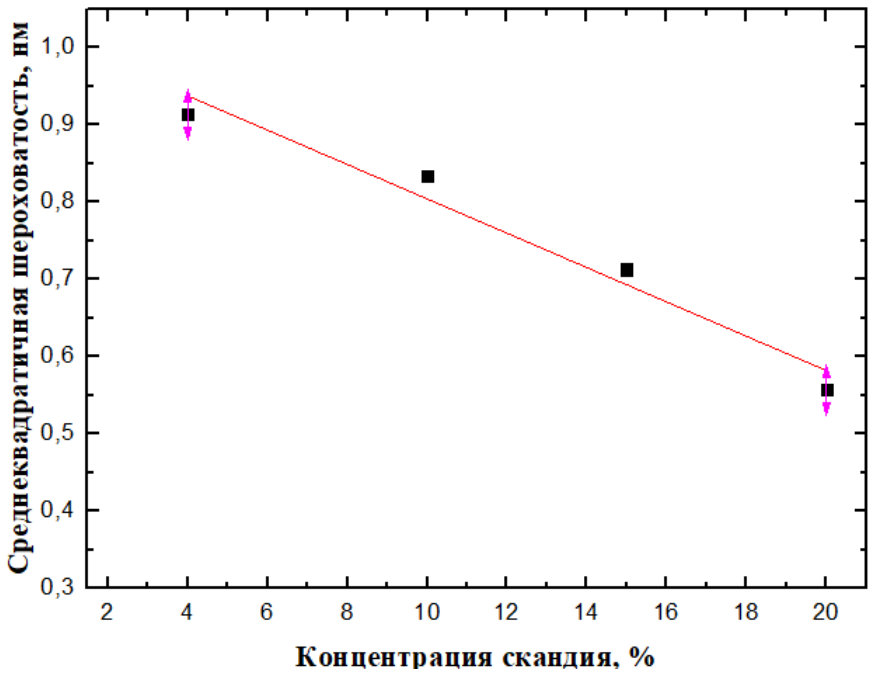


***Рис 1**. Зависимость среднеквадратичной шероховатости поверхности пленок нитрида алюминия-скандия от концентрации скандия*

Исходя из представленной на рис. 1 зависимости становится понятно, что шероховатость поверхности пленок нитрида алюминия-скандия снижается с 0,91 нм, при концентрации скандия – 4%, до 0,55 нм при концентрации скандия – 20%. Показатель преломления полученных пленок находится в диапазоне от 2,13 до 2,23 (рис. 2), что коррелирует с литературными значениями.

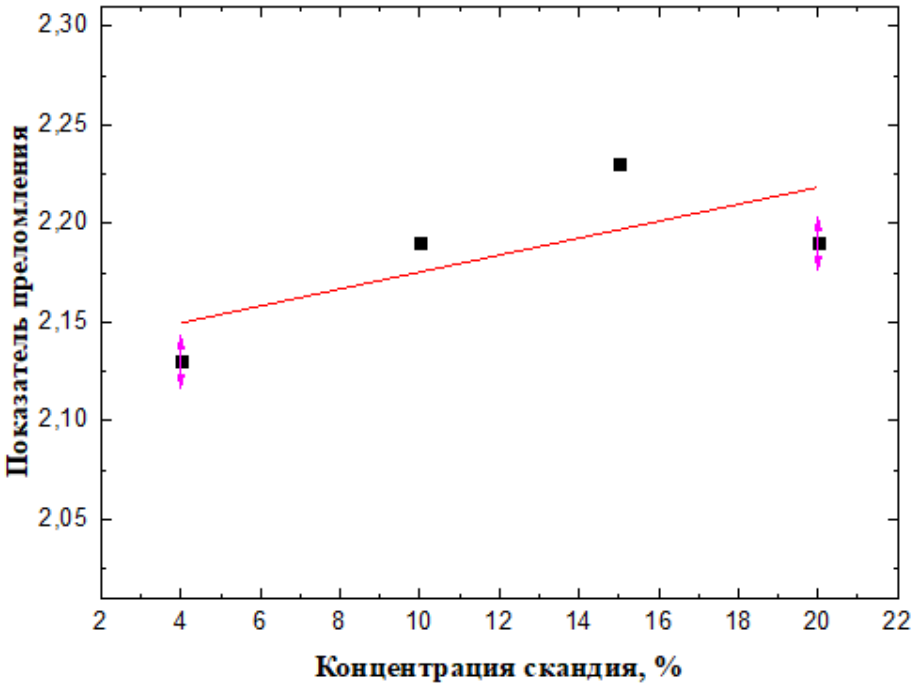


***Рис. 2**. Зависимость показателя преломления пленок нитрида алюминия-скандия от концентрации скандия*

Таким образом, можно сделать вывод о том, что увеличение концентрации скандия в пленках нитрида алюминия приводит к снижению среднеквадратичной шероховатости поверхности, а также незначительному увеличению показателя преломления.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 124022500291-6).

И. А. Лобов[1,2], С. Н. Несов[1], Е. С. Земсков[1,3]
[1]Омский научный центр СО РАН, Омск, Российская Федерация
[2]Омский государственный медицинский университет Минздрава России
Омск, Российская Федерация
[3]Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ Р-БЕНЗОХИНОНА НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПОЛИАНИЛИНА

Аннотация. Исследуются причины повышения электрохимических характеристик полианилина при переосаждении его на поверхность технического углерода. Выявлен значительный рост вклада в накопление заряда за счёт увеличения реакции гидрохинон–бензохинон. Оценка удельной ёмкости полианилина в составе композита показала её трёхкратный рост по сравнению с обычным полимером. За 1000 циклов заряда/разряда материал теряет лишь 7% ёмкости в основном за счёт снижения реакции гидрохинон–бензохинон.
Ключевые слова: псевдоконденсаторы, проводящие полимеры, окислительно-восстановительные реакции, циклическая стабильность, удельная ёмкость.
Для цитирования: Лобов И. А., Несов С. Н., Земсков Е. С. Влияние р-бензохинона на электрохимические характеристики наноструктурированного полианилина // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

I. A. Lobov[1,2], S. N. Nesov[1], E. S. Zemskov[1,3]
[1]Omsk Scientific Center SB RAS, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk State Medical University, Omsk, Russian Federation
[3]Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

EFFECT OF P-BENZOQUINONE ON THE ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED POLYANILINE

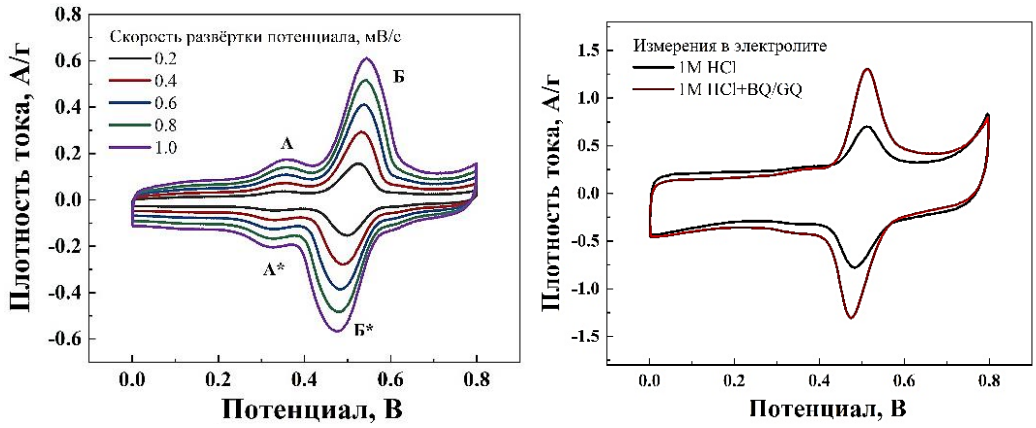
Annotation. The work investigates the reasons for the enhancement of the electrochemical characteristics of polyaniline upon its redeposition onto the surface of carbon black. A significant increase in the contribution to charge storage due to the enhanced hydroquinone–benzoquinone reaction was revealed. Estimation of the specific capacitance of polyaniline within the composite showed a threefold increase compared to the conventional polymer. Over 1000 charge/discharge cycles, the material loses only 7% of its capacitance, mainly due to the decrease in the hydroquinone–benzoquinone reaction.
Keywords: pseudocapacitors, conducting polymers, redox reactions, cycling stability, specific capacitance.
For citation: Lobov I. A., Nesov S. N., Zemskov E. S. Effect of p-benzoquinone on the electrochemical properties of nanostructured polyaniline // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Разработка стабильных и эффективных материалов для электродов различных накопителей энергии является актуальной задачей. Одним из наиболее перспективных материалов для электродов псевдоконденсаторов является полианилина. Благодаря возможности обратимо переходить между различными стабильными окисленными состояниями его теоретическая ёмкость может достигать 2000 Ф/г. Однако чистый ПАНИ

имеет низкую циклическую стабильность в основном из-за слабой механической прочности. Технологически простым решением данной проблемы может являться создание композитных материалов полианилина с углеродными нанообъектами, такими как углеродные нанотрубки или технический углерод. Ранее нами было показано, что переосаждение полианилина на поверхность глобул технического углерода марки CH1000 повышает структурную однородность полимера и улучшает электрохимические характеристики полимера, включая стабильность. В данной работе исследуются причины данного феномена.

Исследуемый в работе композит был получен путём переосаждения растворённого в 1-метил-2-пирролидоне полианилина на поверхность технического углерода марки CH1000. По данным ПЭМ полученный композит повторяет морфологию технического углерода. Наличие полимера подтверждено по наличию полосы N1s из данных РФЭС анализа. Количественный анализ РФЭС (совместно с данными ПЭМ) позволил оценить толщину слоя полимера на поверхности глобул ТУ в 1–2 нм.

На рис. 1*а* приведены циклические вольтамперограммы электрода на основе полученного композита, записанные при скоростях развёртки потенциала от 0,2 до 1 мВ/с. Отчётливо видны две пары окислительно-восстановительных пиков, отмеченные как А/А* и Б/Б*. Первая пара пиков соответствует переходу полианилина между его различными окислительными состояниями – лейкоэмералдин-эмералдин. Вторую пару пиков мы связываем с реакциями превращения гидрохинон-бензохинон, которые могут являться побочными продуктами реакции при синтезе полианилина. Для подтверждения интерпретации данного пика был проведён эксперимент, в котором последовательно записывались циклические вольтамперограммы при скорости развёртки потенциала 1 мВ/с сначала в 1М HCl, а затем в 1М HCl, насыщенной смесью бензохинона и гидрохинона (рис. 1*б*). При этом наблюдается значительный рост пары пиков Б/Б*.



а *б*

Рис. 1. *Циклические вольтамперограммы композита на основе полианилина и технического углерода: а – при скоростях развёртки потенциала от 0,2 до 1 мВ/с; б – в электролите HCl до и после добавления смеси бензохинон-гидрохинон при скорости развёртки потенциала 1 мВ/с*

При увеличении скорости развёртки потенциала окислительные/восстановительные пики смещаются в область больших/меньших потенциалов. Это поведение указывает на квазиобратимый характер протекающих ОВР и связано с кинетическими и диффузионными ограничениями носителей заряда. Анализ зависимости пиковых токов от скорости развёртки потенциала указал на полностью поверхностно контролируемый процесс для пары пиков А/А* и смешанном характере реакции, соответствующей паре пиков Б/Б*, где одновременно вносят вклад диффузионный и емкостной механизмы накопления заряда.

Значение удельной ёмкости полученного композита при скорости развёртки потенциала 0,2 мВ/с составляет 204 Ф/г (а исходного полимера 281 Ф/г). Если из этого

значения исключить вклад технического углерода, то оценочная удельная ёмкость самого полимера получается около 941 Ф/г. Таким образом, данный метод позволяет значительно повысить электрохимическую эффективность полианилина.

Циклическая стабильность полученного композита исследовалась путём измерения 1000 циклов потенциостатического заряда/разряда в режиме циклической вольтамперометрии в окне потенциалов от 0 до 0,8 В при скорости развёртки потенциала 40 мВ/с. На рис. 2 приведена зависимость относительной ёмкости от номера цикла. Наблюдается её монотонное снижение от первоначального до значения 93% на тысячном цикле. Снижение ёмкости в основном связано с уменьшением интенсивности окислительно-восстановительной реакции гидрохинон-бензохинон (вставка на рис. 2). При этом практически не наблюдается снижение интенсивности плотности тока на остальных участках циклической вольтамерограммы после 1000 циклов. Это свидетельствует о повышении резистивности к электрохимической деградации полимера благодаря его стабилизации техническим углеродом.

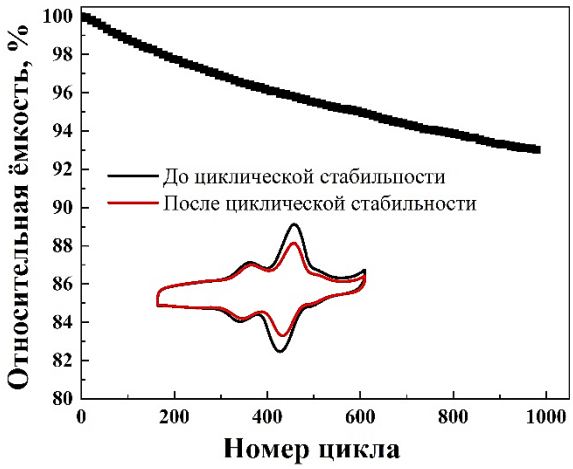


Рис. 2. *Зависимость относительной ёмкости композита на основе полианилина и технического углерода от номера цикла заряда/разряда. Во вставке – циклические вольтамперограммы на первом и тысячном цикле*

Переосаждение полианилина на поверхность технического углерода марки позволяет формировать тонкий (1–2 нм) однородный слой полимера, что существенно улучшает его электрохимические характеристики. Показан значительный рост интенсивности окислительно-восстановительной реакции гидрохинон–бензохинон в данном материале. Композит демонстрирует удельную ёмкость 204 Ф/г, при этом оценочная ёмкость самого полианилина достигает 941 Ф/г, что значительно превышает значения для чистого полимера. Снижение значений ёмкости при испытаниях циклической стабильности на 7% после 1000 циклов обусловлено ослаблением редокс-реакции гидрохинон–бензохинон. При этом остальные участки вольтамперограмм не претерпевают изменений, что позволяет говорить о стабилизации полимера поверхностью технического углерода. Таким образом, предложенный подход получения электродного материала на основе полианилина и технического углерода является перспективным для формирования электродов псевдоконденсаторов.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 126012716038-5).

А. А. Мальгинова[3], А. Ю. Куклев[1,2,3], В. И. Струнин[1,3]
[1]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[3]Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

РАДИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ

Аннотация. Представлены результаты исследований плазмы магнетронного разряда в зависимости от мощности разряда. Описана методика двойного зонда Ленгмюра. Показано, что параметры плазмы увеличиваются с ростом мощности разряда. Температура и плотность снижаются от центра к периферии. Максимум $T_e \approx 6,4$ эВ, минимум $T_e \approx 1,1$ эВ. Значения плотности в диапазоне от $1{,}75 \cdot 10^{16}$ до $3{,}4 \cdot 10^{16}$ м$^{-3}$.
Ключевые слова: плазма магнетронного разряда, двойной зонд Ленгмюра, температура электронов, плотность электронов.
Для цитирования: Мальгинова А. А., Куклев А. Ю., Струнин В. И. Радиальное распределение плотности и температуры электронов в магнетронном разряде // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. A. Malginova[3], A. Yu. Kuklev[1,2,3], V. I. Strunin[1,3]
[1]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radio physics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[3]Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

RADIAL DISTRIBUTION OF ELECTRON DENSITY AND TEMPERATURE IN A MAGNETRON DISCHARGE

Annotation. Results of a study on a magnetron discharge as a function of discharge power are presented. The double Langmuir probe technique is described. It is shown that plasma parameters increase with increasing discharge power. Temperature and density decrease from the center to the periphery. The maximum $T_e \approx 6.4$ eV, and the minimum $T_e \approx 1.1$ eV. Density values range from $1{,}75 \cdot 10^{16}$ to $3{,}4 \cdot 10^{16}$ m^{-3}.
Keywords: magnetron discharge plasma, double Langmuir probe, electron temperature, electron density.
For citation: Malginova A. A., Kuklev A. Yu., Strunin V. I. Radial Distribution of Electron Density and Temperature in a Magnetron Discharge // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В настоящее время актуальна проблема созданиям микроэлектронного резонатора с брэгговским отражателем, работающим на основе объемных акустических волн. Пленки алюминия используются как низкоимпедансные слои брэгговского отражателя и как электроды пьезоэлектрического преобразователя. Такие пленки формируются методом магнетронного распыления мишени в вакууме.

Качество пленок зависит от равновесного состава плазмообразующего газа, в нашем случае – аргона (Ar). Чем больше будет плотность электронов в плазме, тем больше будет частота элементарных процессов – диссоциации, ионизации. Для этого нужно контролировать концентрацию и температуру электронов в плазме. Это дает возможность управлять процессом напыления и свойствами пленок.

Целью данной работы является измерение радиального распределения плотности и температуры электронов при изменении мощности разряда.

Измерения были проведены на установке магнетронного распыления с катодным узлом планарной конструкции, в котором магнитное поле создается центральным и внешними кольцевыми магнитами. На водоохлаждаемый катод при помощи токопроводящего состава была установлена мишень алюминия диаметром 150 мм и толщиной 5 мм. Исследование параметров аргоновой плазмы магнетронного разряда проводились методом двойного электрического зонда. Конструктивно зонды были выполнены в виде нихромовой проволоки диаметром 0,3 мм с длиной собирающей поверхности, равной 6 мм. Расстояние между концами зондов составило 4 мм. Напряжение смещения в диапазоне ± 50 В было подано на двойной зонд от генератора развертки. Измерения проводились в диапазоне мощности $P \sim$ (500–700 Вт,) давление p = 0, 07 Па, по радиусу мишени от центра до края $r \sim$ (15–75 мм), на расстоянии от поверхности мишени z = 45 мм.

После проведения измерений были получены вольт-амперные характеристики. На реальных вольт-амперных характеристиках можно заметить смещение от центра (рис. 1). Оно обусловлено разностью потенциалов внутри плазмы, что даёт отклонения от классического представления вольт-амперных характеристик двойного зонда.

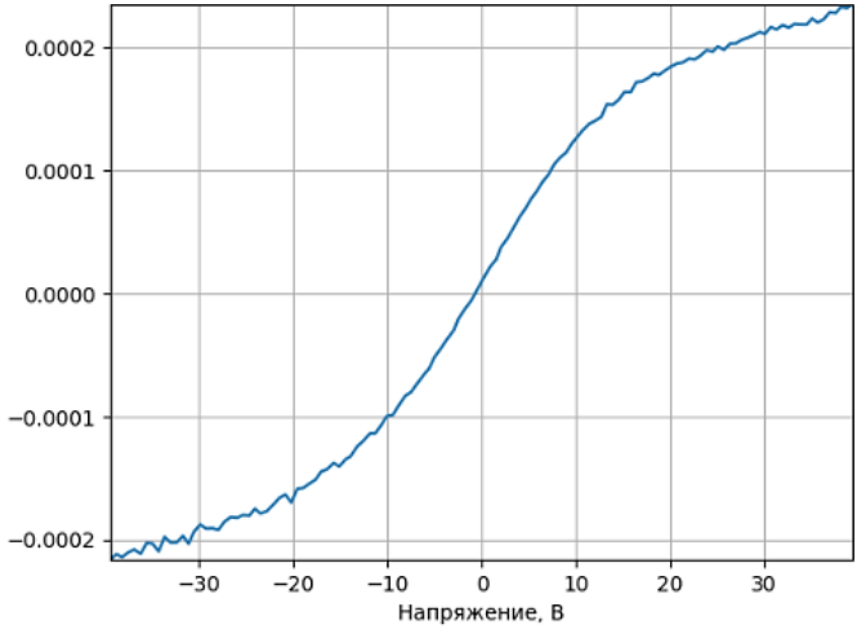


***Рис. 1**. Вольт-амперная характеристика*

После обработки вольт-амперных характеристик были получены графики зависимостей. На рис. 2 – зависимости плотности электронов по радиусу. Плотность убывает к периферии мишени, но резко возрастает на 60 мм по радиусу, где находится зона эрозии мишени, вследствие чего может возрастать плотность. Максимум $n_e \approx 3,4 \cdot 10^{16}$ м$^{-3}$, минимум $n_e \approx 1,75 \cdot 10^{16}$ м$^{-3}$. Температура уменьшается от центра к периферии мишени. Максимум $T_e \approx 6,4$ эВ достигается в центре мишени при 700 Вт. Минимум при мощности 500 Вт $T_e \approx 1,1$ эВ. С увеличением мощности от 500 до 700 Вт повышаются температура и плотность электронов, это связано с увеличением кинетической энергии электронов и, как следствие, повышением актов ионизаций.

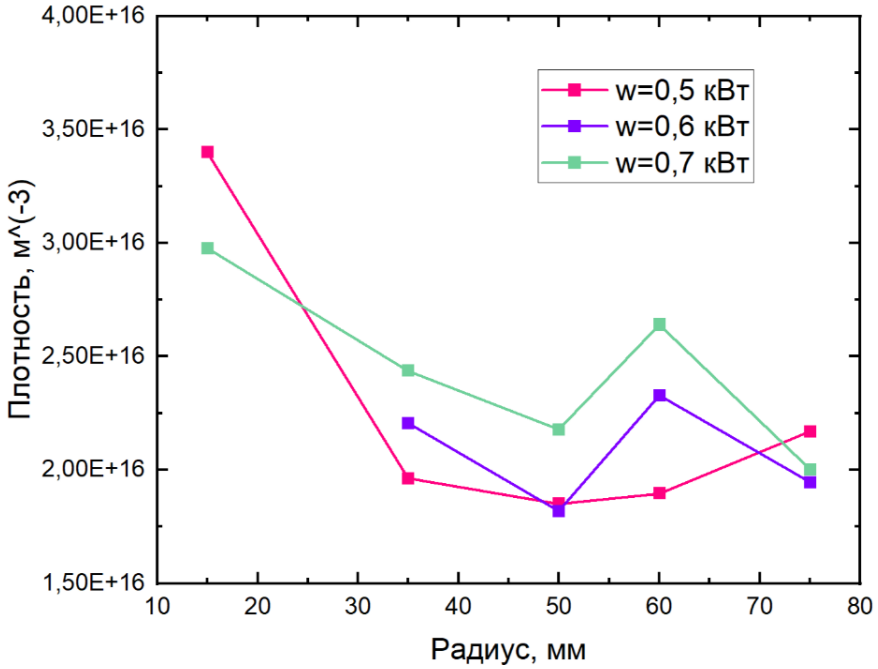


***Рис.** 2. Зависимость плотности электронов от положения по радиусу мишени*

Таким образом, можно сделать вывод о том, что увеличение мощности приводит к увеличению температуры и плотности электронов в плазме. На периферии мишени параметры плазмы снижаются, в сравнении с центром.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 124022500291-6).

С. А. Матюшенко, С. Н. Несов
Омский научный центр СО РАН, Омск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЁМКОСТНЫЕ СВОЙСТВА СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ МАТРИЦ И ДИОКСИДА МАРГАНЦА, ДОПИРОВАННОГО ИОНАМИ КАЛИЯ

Аннотация. Работа посвящена изучению степени влияния методов подготовки электродного состава и механической постобработки токосъёмников на ёмкость и внутреннее сопротивление электродов суперконденсаторов. Установлено, что наиболее значимый вклад в улучшение характеристик оказывает этап прессования электродов. Механическая прокатка на валковом прессе позволяет снизить удельное сопротивление слоя, что особенно актуально для псевдоёмкостных материалов (таких как диоксид марганца) с низкой электропроводностью.
Ключевые слова*:* гидротермальный синтез, слоистый оксид, YP-50F, Super P, вакуумный миксер, валковый пресс.
Для цитирования*:* Матюшенко С. А., Несов С. Н. Влияние технологических условий формирования электродов на электрофизические и ёмкостные свойства суперконденсаторов на основе углеродных матриц и диоксида марганца, допированного ионами калия // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

S. A. Matyushenko, S. N. Nesov
Omsk Scientific Center SB RAS, Omsk, Russian Federation

EFFECT OF TECHNOLOGICAL CONDITIONS OF ELECTRODE FABRICATION ON THE ELECTROPHYSICAL AND CAPACITIVE PROPERTIES OF SUPERCAPACITORS BASED ON CARBON MATRICES AND POTASSIUM-DOPED MANGANESE DIOXIDE

Annotation. The work studies how electrode composition preparation and mechanical post-treatment of current collectors affect supercapacitor capacitance and internal resistance. The electrode pressing stage contributes most to performance improvement. Mechanical rolling on a roll press reduces layer resistivity, which is especially relevant for low-conductivity pseudocapacitive materials like manganese dioxide.
Keywords*:* hydrothermal synthesis, layered oxide, YP-50F, Super P, vacuum mixer, roller press.
For citation*:* Matyushenko S. A., Nesov S. N. Effect of technological conditions of electrode fabrication on the electrophysical and capacitive properties of supercapacitors based on carbon matrices and potassium-doped manganese dioxide // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

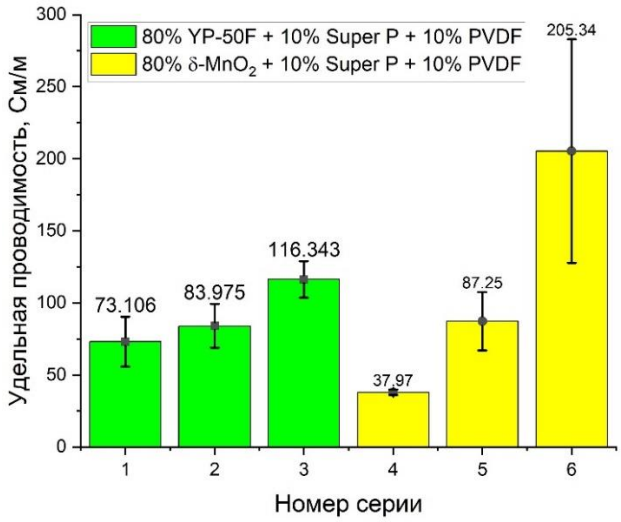
Важнейшими характеристиками суперконденсатора являются электрическая ёмкость и внутреннее сопротивление. Ёмкость определяет суммарный запас энергии и зависит от свойств материала, накапливающего заряд, а сопротивление влияет на мощностные показатели и напрямую связано с электропроводностью активного слоя электрода. Существует 2 основных механизма накопления заряда, реализуемых в суперконденсаторах: зарядка двойного электрического слоя на границе электрод/электролит

(ёмкость двойного электрического слоя) и запасание энергии за счёт обратимых окислительно-восстановительных реакций (псевдоёмкость). Значительным преимуществом псевдоёмкостных материалов (таких, как RuO2, MnO2, Fe3O4, NiO и т.д.) перед стандартными составами на основе активированных углей является их крайне высокая величина удельной ёмкости, выраженная в Ф/г. Для MnO2 верхний предел составляет ~1370 Ф/г, в то время как для электродов на основе специальных марок углей этот диапазон ограничен величиной ~300 Ф/г. Однако процесс изготовления электродов суперконденсаторов состоит из множества этапов: подготовка материалов, смешивание компонентов электродного состава, нанесение суспензии на токосъёмники, постобработка и т.д. Всё это приводит к необходимости строгого соблюдения отработанных методик для получения воспроизводимых результатов, что в условиях лаборатории не всегда достижимо. Поэтому целью данного исследования является оценка степени влияния некоторых технологических условий формирования электродов суперконденсаторов на их характеристики.

Для экспериментов было подготовлено 6 серий образцов. Каждая серия содержала по 3 электрода для электрохимических испытаний и по 5 полиимидных пластинок с нанесённым слоем электродного состава для измерения удельной проводимости. Серии 1-3 изготавливались с применением электродного состава на основе коммерческих марок активированного угля YP-50F (80 масс.%), технического углерода Super P (10 масс.%), связующего поливинилиденфторида (10 масс.%) и растворителя N-метил-2-пирролидона в концентрации 80 масс.% от общей массы всего раствора. Все компоненты сначала смешивались в сухом виде, а затем к ним добавлялся растворитель. Далее для серии 1 проводилось ручное перемешивание и нанесение пасты на пластинки нержавеющей сетки AISI316, которые после вакуумной сушки прессовались вручную; для серии 2 – перемешивание в течение 1 часа на вакуумном миксере с последующим фильтрованием суспензии и аналогичным серии 1 этапом формирования электродов; для серии 3 – то же, что и для серии 2, но с прессованием электродов на валковом прессе с фиксированным зазором валов. Параллельно готовились слои электродного состава на полиимидных подложках путём нанесения суспензии ракелем с зазором ножа 200 мкм. Полученные образцы сушились до полного удаления растворителя. Во всех случаях прессование электродов проводилось только после сушки. Для серий 4-6 использовались те же технологические подходы, что и для серий 1-3, соответственно. Разница состояла только в том, что в качестве основного компонента электродного состава применялся полученный гидротермальным методом диоксид марганца, допированный калием (δ-MnO_2). Для этого 7 г порошка $KMnO_4$ растворялось в 131,5 мл дистиллированной воды при постоянном перемешивании на магнитной мешалке при температуре 50°C. После полного растворения перманганата в раствор добавлялось 1,86 мл 65% HNO_3. Полученный раствор делился на 2 порции по 60 мл и заливался в 2 тефлоновых автоклавы объёмом по 100 мл. Автоклавы помещались в сушильный шкаф на 12 ч и выдерживались при 160°C. По окончании синтеза осадок промывался дистиллированной водой и изопропиловым спиртом, после чего сушился, перетирался и использовался для приготовления электродной пасты.

Согласно результатам 4-зондовых измерений удельной проводимости слоёв электродного материала (см. рис.), использование вакуумного миксера и последующее фильтрование суспензии (серия 2) на основе коммерческого активированного угля YP-50F не даёт заметного увеличения электропроводности плёнок по сравнению с ручным методом перемешивания (серия 1). Заметная позитивная динамика наблюдается только при использовании валкового пресса на этапе постобработки электродов (серия 3). Для образцов, содержащих в качестве основного активного материала δ-MnO_2, проводимость изменяется значительно сильнее в зависимости от метода подготовки суспензии и прокатки: при ручном перемешивании наблюдается минимальная проводимость плёнок с

незначительным разбросом (серия 4), смешивание состава в вакуумном миксере и последующая фильтрация приводит к улучшению электропроводности в 2,3 раза (серия 5) и в 5,4 раза – после прокатки на прессе (серия 6).



Распределение удельной проводимости образцов в зависимости от номера серии

Электрохимические измерения, выполненные в трёхэлектродной ячейке с 1M Na_2SO_4 электролитом, также свидетельствуют об уменьшении внутреннего сопротивления прессованных углеродных электродов с 1,02±0,06 Ом (серия 1) до 0,60±0,04 Ом (серия 3), а удельная ёмкость, определённая при разрядном токе 2 А/г, незначительно изменилась с 56,99±2,18 Ф/г до 59,41±3,53 Ф/г соответственно. Для электродов 4 серии максимальное значение удельной ёмкости при токе 0,1 А/г составило 131,14±4,23 Ф/г против 63,21±4,06 Ф/г для серии 3 при том же токе. Такая значительная разница обусловлена псевдоёмкостным вкладом δ-MnO_2. Однако при повышении значения тока до 2 А/г удельная ёмкость электродов 4 серии падает до 91,39±5,32 Ф/г. Образцы электродов серий 5 и 6, несмотря на рост проводимости плёнок, сформированных на полиимидных подложках, по характеристикам ёмкости и сопротивления оказались хуже образцов серии 4, изготовленных ручным методом. Так, при токе 0.1 А/г для серии 5 удельная ёмкость составила 66,30±12,63 Ф/г, а для серии 6 – 79,24±11,61 Ф/г при сопротивлении 14,31±2,77 Ом и 15,46±2,54 Ом, соответственно. Такой эффект, наиболее вероятно, обусловлен влиянием этапа фильтрования суспензии после перемешивания. В случае использования активированного угля YP-50F с высокой степенью дисперсности фильтрование не приводит к значительному задерживанию частиц и изменению процентного содержания компонентов смеси. Фильтрация составов серий 5 и 6 на основе низкодисперсного порошка δ-MnO_2 может заметно снижать концентрацию основного наполнителя, что и отражается на удельных показателях. Одно из решений данной проблемы – повышение степени перетира синтезируемых порошков δ-MnO_2.

Таким образом, технологические условия формирования электродов суперконденсаторов оказывают существенное влияние на их электрофизические и ёмкостные свойства. Прокатка электродов на валковом прессе заметно повышает проводимость активного слоя, что в конечном итоге снижает внутреннее сопротивление готового устройства, увеличивая его мощность. В некоторых случаях применение стандартных производственных протоколов (таких, как фильтрация электродного состава перед нанесением на токосъёмники) для материалов, полученных в лабораторных условиях и не прошедших специальной подготовки, напротив, может негативно отразиться на основных характеристиках.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 126012716038-5).

А. С. Паленова, А.Д. Дорохов, К. А. Варков
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГЕРМЕТИЗАЦИИ МИНИАТЮРНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Аннотация. Рассматриваются особенности технологического процесса герметизации миниатюрных резонаторов с использованием современных методов и материалов. Основное внимание уделяется проблеме автоматизации процесса и обеспечению качества герметизации. Целью исследования является разработка усовершенствованного способа герметизации пайкой, исключающего попадание расплавленного припоя в критичные зоны.
Ключевые слова*:* герметизация, микрокорпуса, припойные материалы, автоматизация, технологический процесс, контроль качества.
Для цитирования*:* Паленова А. С., Дорохов А. Д., Варков К. А. Особенности технологического процесса герметизации миниатюрных резонаторов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. S. Palenova, A. D. Dorokhov, K. A. Varkov
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

FEATURES OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF SEALING MINIATURE RESONATORS

Annotation. The article examines the features of the technological process of sealing miniature resonators using modern methods and materials. The main attention is paid to the problem of process automation and ensuring the quality of sealing. The aim of the study is to develop an improved sealing method that prevents molten solder from entering critical zones.
Keywords*:* sealing, microcases, solder materials, automation, technological process, quality control.
For citation*:* Palenova A. S., Dorokhov A. D., Varkov K. A. Features of the Technological Process of Sealing Miniature Resonators // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В современных условиях развития микроэлектроники особое значение приобретает совершенствование технологий герметизации микрокорпусов.

Герметизация является одним из наиболее ответственных этапов изготовления электронных компонентов, поскольку от качества герметичного соединения напрямую зависят надёжность и стабильность работы изделия.

Одной из основных проблем герметизации пайкой является неконтролируемое растекание расплавленного припоя. При этом припой может затекать во внутреннюю полость корпуса и попадать в область размещения бескорпусных элементов. Это особенно критично для миниатюрных электронных компонентов, где расстояние между герметизирующим соединением и чувствительными элементами очень мало.

Дополнительной проблемой является сложность автоматизации процесса. В частности, возникают трудности при автоматизированной укладке крышки, припойной преформы и основания микрокорпуса с использованием универсального захвата.

Таким образом, существует необходимость в технологическом решении, которое

одновременно обеспечивает: предотвращение попадания расплавленного припоя в область размещения бескорпусных элементов, стабильное формирование герметичного соединения, автоматизацию укладки деталей микрокорпуса, повышение качества и надёжности герметизации, – это и является целью данной работы.

Основная идея заключается в изменении взаимного расположения деталей микрокорпуса и направления действия прижимного усилия. Микрокорпус при герметизации устанавливается в перевёрнутом положении – крышкой вниз. При этом используется сплошная припойная преформа с избыточным количеством припойного материала. Во время нагрева припой расплавляется и под действием прижимного усилия и выбранного положения корпуса перераспределяется преимущественно вдоль внешнего края металлизированной обечайки корпуса. Таким образом, избыточная часть расплавленного припоя направляется не внутрь корпуса, а выходит за пределы внутренней полости и формирует внешний боковой припойный валик.

Процесс герметизации при таком процессе осуществляется следующим образом.

1. Укладка деталей.

С помощью универсального захвата автоматизированной установки на оснастку последовательно укладываются крышка микрокорпуса, сплошная припойная преформа, основание микрокорпуса с размещёнными бескорпусными элементами. При этом обеспечивается заданное взаимное положение всех деталей.

2. Установка оснастки.

Оснастка с уложенными деталями устанавливается на нагревательный стол автоматизированной установки. Микрокорпус располагается крышкой вниз.

3. Прижим.

В центральной части микрокорпуса устанавливается прижимной шток. Прижимное усилие передаётся на дно микрокорпуса, обеспечивая плотное прилегание соединяемых деталей.

4. Подготовка атмосферы.

Нагревательный стол располагается под колпаком атмосферной камеры. Перед герметизацией выполняется термовакуумная сушка, после чего создаются заданные условия атмосферы для проведения процесса пайки.

5. Нагрев.

Нагревательный стол осуществляет автоматическое изменение температуры. Температура нагрева выбирается выше температуры плавления используемого припоя. В рассматриваемом технологическом режиме температура стола превышает температуру плавления припоя примерно на 20 °C.

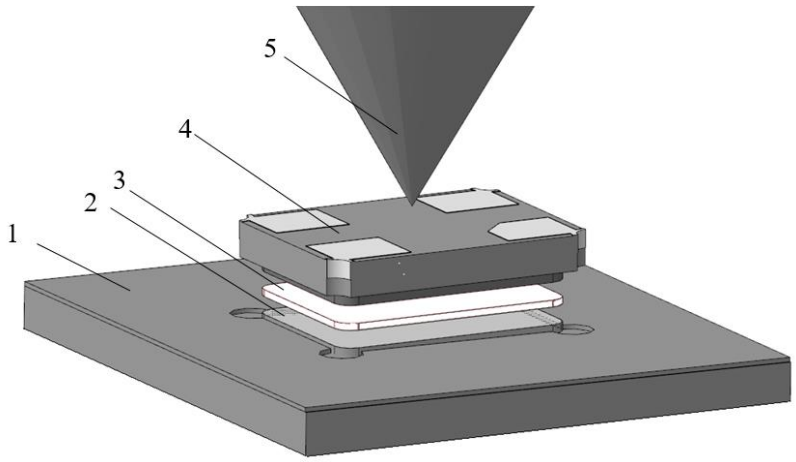
6. Перераспределение припоя.

При расплавлении сплошной преформы её избыточный объём перераспределяется вдоль внешнего края металлизированной обечайки микрокорпуса. В результате часть припоя выходит за пределы внутренней полости корпуса и образует внешний боковой припойный валик. Такое перераспределение препятствует затеканию расплавленного припоя внутрь корпуса и его попаданию в область размещения бескорпусных элементов.

На рисунке представлена схема укладки микрокорпуса с использованием сплошной припойной преформы. Технический результат достигается за счёт совокупного применения нескольких технологических решений:

- использования сплошной припойной преформы с избыточным количеством припоя;
- перевёрнутого расположения микрокорпуса при герметизации – крышкой вниз;
- приложения прижимного усилия к дну микрокорпуса;
- автоматизированной укладки деталей с использованием универсального захвата;
- контролируемого температурного режима герметизации.

Совокупность указанных факторов обеспечивает перераспределение расплавленного припоя в направлении внешнего края металлизированной обечайки.



Вид укладки микрокорпусов с применением сплошной преформы припоя:
1 – оснастка, 2 – крышка микрокорпуса, 3 – преформа припоя,
4 – основание микрокорпуса с размещенным бескорпусными элементами, 5 – прижимной шток

Данный способ имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными способами герметизации: клеевым соединением, сваркой и пайкой по периметру.

Новизна данного подхода заключается не только в использовании припоя или сплошной преформы. Основное отличие состоит в совместном использовании формы припойной преформы, ориентации микрокорпуса и направления прижимного усилия для управления перераспределением расплавленного припоя. При этом избыточный объём припоя используется не как источник дефекта, а как технологический ресурс для формирования внешнего бокового припойного валика. Таким образом, геометрия преформы и положение микрокорпуса используются для управления поведением расплава и защиты внутренней области корпуса.

Данный способ был апробирован и отработан на миниатюрных корпусах 1,6х2,1, рассчитано необходимое давление прижимного штока, которое составило ~0,19 кг/см^2.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение области применения метода на другие типы микрокорпусов и изделий.

П. А. Пятанова[1,2], Т. В. Ложникова[2]
[1]Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ТРАВЯЩЕГО РАСТВОРА И ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДЛЯ КАТАНГАСИТА

Аннотация. Оптимальным технологическим режимом химического травления пластин катангасита является обработка в растворе плавиковая кислота – фторид аммония (1:3), при температуре 60 °С, что обеспечивает скорость травления 1 мкм/мин при сохранении структуры поверхности. Зависимость скорости травления от температуры носит экспоненциальный характер.
Ключевые слова: химическое травление, катангасит, скорость травления, влияние температуры.
Для цитирования: Пятанова П. А., Ложникова Т. В. Определение оптимального состава травящего раствора и параметров процесса для катангасита // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

P. A. Pyatanova[1,2], T. V. Lozhnikova[2]
[1]Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

CHEMICAL ETCHING OF KATANGASITE PLATES DETERMINATION OF THE OPTIMAL ETCHING SOLUTION COMPOSITION ANA PROCESS PARAMETERS FOR KATANGASITE

Annotation. The optimal technological regime for chemical etching of katangasite plates is treatment in hydrofluoric acid – ammonium fluoridesolution at a temperature of 60 °C, which provides an etch rate of 1 μm/min while preserving the structural perfection of the surface. The dependence of the etching rate on temperature is exponential in nature.
Keywords: chemical etching, katangasite, etching rate, effect of temperature
For citation: Pyatanova P. A., Lozhnikova T. V. Determination of the optimal etching solution composition and process parameters for katangasite // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Перспективным материалом для пьезоэлектрических датчиков является синтетический катангасит ($Ca_3TaGa_3Si_2O_{14}$), превосходящий кварц по коэффициенту электромеханической связи. Однако высокая химическая стойкость кристалла требует разработки специализированных режимов размерной обработки, обеспечивающих заданную скорость химического травления материала без ухудшения амплитудно-частотных характеристик.

Цель данной работы – исследование особенностей химического травления тонких пластин катангасита и установление технологических режимов, обеспечивающих высокую скорость травления и сохранность поверхностного слоя.

В данном исследовании был применен химический способ травления. Образцы –

прямоугольные тонкие пластины катангасита. Скорость травления оценивалась косвенным методом по изменению резонансной частоты пластин до и после обработки с использованием прибора для измерения амплитудно-частотных характеристик.

В качестве травителей применялись растворы на основе плавиковой кислоты с добавками солей аммония (хлорида, фторида и бромида) в объёмном соотношении 1:3. В каждом режиме на образцах проводилось не менее трех параллельных испытаний.

Установлено, что максимальная эффективность достигается при использовании смеси 40% NH_4F (15 мл) и 44% HF (5 мл). Скорость травления в данном растворе составляет 1 мкм/мин, поверхность пластин характеризуется отсутствием дефектов и сохранением качественной амплитудно-частотной характеристики.

Показано, что замена NH_4F на NH_4Br или NH_4Cl в составе травящего раствора приводит к снижению скорости процесса. Механизм травления имеет комплексообразовательную природу: фторид-ион образует устойчивые растворимые фторокомплексы например $[SiF_6]^{2-}$, $[TaF_7]^{2-}$) с компонентами кристаллической решетки, тогда как бромид- и хлорид-ионы не обеспечивают эффективного комплексообразования.

Было исследовано влияние температуры на процесс химического травления катангасита. Исследование температурной зависимости показало наличие двух конфликтующих критериев: в интервале 20–60 °C качество поверхности высокое, но скорость травления недостаточна; в интервале 60–90 °C достигается требуемая скорость, однако при температурах выше 60 °C наблюдается ухудшение качества поверхности. Установлено, что температура 60 °C является единственной точкой технологического компромисса, обеспечивающей одновременное выполнение обоих требований. Зависимость скорости травления от температуры носит экспоненциальный характер. Коэффициент аппроксимации экспериментальных данных теоретической моделью составляет $R^2 = 0{,}99$, что подтверждает высокую воспроизводимость результатов и адекватность модели Аррениуса для данного процесса.

Таким образом установлено, что оптимальным технологическим режимом химического травления пластин катангасита является обработка в растворе $HF + NH_4F$ (1:3) при температуре 60 °C, что обеспечивает скорость травления 1 мкм/мин при сохранении структуры поверхности. Зависимость скорости травления катангасита от температуры в растворе данного состава имеет экспоненциальный характер.

Р. Р. Сафин, В. Р. Иванова
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Российская Федерация

МЕТОДИКА СРАВНЕНИЯ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПУСКОВОГО ТОКА ПО ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ДИОДЫ S2M

Аннотация. Предлагается методика сравнения трёх схем ограничения пускового тока по воздействию на диоды входного выпрямителя. Обоснованы условия перехода от токовых показателей к энергии потерь и температуре перехода. Предусмотрены учёт начального состояния, регистрация полного пуска и проверка достоверности расчёта. Методика предназначена для будущего исследования; результаты сравнительных испытаний не представлены.
Ключевые слова: пусковой ток, ограничитель тока, выпрямительный диод, энергия потерь, температура перехода, электротепловое моделирование.
Для цитирования: Сафин Р. Р., Иванова В. Р. Методика сравнения ограничителей пускового тока по электротепловому воздействию на диоды S2M // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

R. R. Safin, V. R. Ivanova
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

METHOD FOR COMPARING INRUSH CURRENT LIMITERS BY THEIR ELECTROTHERMAL EFFECT ON S2M DIODES

Annotation. A method is proposed for comparing three inrush current limiting circuits by their effect on input rectifier diodes. Conditions for deriving loss energy and junction temperature from current metrics are specified. The method accounts for initial conditions, the complete startup waveform and model verification. It is intended for a future study; comparative test results are not presented.
Keywords: inrush current, current limiter, rectifier diode, loss energy, junction temperature, electrothermal modelling.
For citation: Safin R. R., Ivanova V. R. Method for comparing inrush current limiters by their electrothermal effect on S2M diodes // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

При включении сетевого источника питания светодиодных устройств заряд входного конденсатора создаёт импульсную нагрузку на диоды выпрямителя. Ограничение максимального тока изменяет также форму и длительность переходного процесса. Поэтому снижение одного пика не даёт достаточного основания для вывода об уменьшении нагрева диода. Цель работы – предложить методику сравнения ограничителей, связывающую ток отдельного диода с энергией потерь и температурой перехода при контролируемых условиях пуска.

Объектом будущего исследования предлагается принять входной каскад имеющегося источника питания Eleganz с мостовым выпрямителем на диодах S2M. Рассматриваются термистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, ограничитель на полевом транзисторе со структурой металл–оксид–полупроводник и резисторно-релейная схема. Сравнение предусматривается на одном источнике при неизменных конденсаторе и нагрузке. Изготовитель и корпус установленных диодов

подлежат идентификации; параметры найденного аналога нельзя автоматически приписывать исследуемому прибору.

Для сравнения предлагаются конкретные реализации: последовательный термистор без шунтирования, транзистор с обратной связью по току и резистор с последующим шунтированием контактами реле. Расположение элементов, питание управления и условия завершения ограничения фиксируют по фактической схеме. Настройку выполняют по общему требованию к предельному току и допустимому времени запуска, после чего сохраняют для всех исследуемых режимов. Работу транзистора проверяют по области безопасной работы с учётом напряжения, тока, длительности воздействия и начальной температуры. Базовым режимом служит включение без дополнительного ограничителя.

Для каждого включения фиксируют напряжение и фазу подачи питания, параметры питающей цепи, остаточное напряжение конденсатора, нагрузку и начальное тепловое состояние. Холодный пуск и повторное включение исследуют раздельно. В последнем случае задают общий предшествующий режим работы и одинаковую программу отключения. Различие температур ограничителей после одинаковой паузы рассматривают как часть их поведения. Особого контроля требуют охлаждение термистора и возврат цепей управления в исходное состояние.

Регистрация должна охватывать весь пуск, включая возможный повторный бросок при замыкании реле. Общее окно наблюдения и критерий выхода на рабочий режим задают до основной серии. Необходимы исходные временные ряды, позволяющие установить ток силовой ветви, заряд конденсатора и состояние ограничителя. Пригодность аппаратуры проверяют по напряжению, изоляции, полосе и синфазному сигналу; влияние шунта и соединений учитывают в параметрах цепи. Число повторов выбирают по предварительной оценке разброса и требуемой точности сравнения.

Ток отдельного диода определяют непосредственно либо восстанавливают по проверенной схеме и интервалам проводимости пар моста. Общий входной ток может включать токи фильтра и управления, поэтому его нельзя без проверки считать током диода. Показатели рассчитывают для всех диодов: наиболее нагруженный прибор может меняться при изменении фазы, режима или реализации ограничителя. Максимум тока и длительность воздействия дополняют перенесённым зарядом и интегралом квадрата тока за заданное окно.

Энергию потерь проводимости определяют интегрированием произведения прямого напряжения и тока диода. Если напряжение задаётся моделью, полученная энергия остаётся расчётной величиной. При линейном приближении прямой характеристики с постоянными параметрами энергия содержит вклад, пропорциональный заряду, и вклад, пропорциональный интегралу квадрата тока. Следовательно, ранжирование вариантов только по второму показателю обосновано при равном заряде и применимости общих параметров модели. При различающемся заряде уменьшение интеграла квадрата тока само по себе не определяет изменение энергии.

Равное конечное напряжение конденсатора не обеспечивает равенства заряда каждого диода: распределение проводимости по полупериодам и питание нагрузки во время пуска могут различаться. При существенном изменении температуры прямую характеристику необходимо обновлять в расчёте. Потери обратного восстановления учитывают отдельно, если их вклад значим. Энергию в общем окне наблюдения отличают от избыточных пусковых потерь: выделение последних требует обоснованного базового режима. Потери ограничителя и питания его управления оценивают отдельно от потерь диодов.

Для определения температуры перехода предлагается использовать временную зависимость мощности потерь и применимую переходную тепловую характеристику.

Замена импульса постоянной мощностью при сохранении энергии может изменить максимальную температуру, поэтому допустимость усреднения требует проверки. При повторном включении учитывают нагрев за предшествующую работу и охлаждение в паузе. Начальные условия многозвенной тепловой модели нельзя восстановить по одному значению температуры перехода.

Если переходная тепловая характеристика или геометрия кристалла не подтверждены, температурный этап ограничивают анализом чувствительности к обоснованным параметрам. При отсутствии достаточных исходных сведений сравнение завершают на уровне электрических показателей. Температура поверхности корпуса может использоваться для проверки теплоотвода, однако не заменяет температуру перехода. Общность упрощений нескольких режимов не доказывает взаимного сокращения расчётных ошибок.

Настройку электрической модели и её проверку проводят на разных записях. Совпадение с данными, по которым идентифицированы параметры, не является независимой проверкой. Для разности показателей двух вариантов учитывают разброс повторов, неопределённость измерений и общие ошибки модели. Направление различия предлагается считать устойчивым, если оно сохраняется при учёте этих факторов в обоснованной области параметров. Если различие не разрешается доступной точностью, преимущество одного варианта не устанавливают.

Методический результат работы состоит в определении оснований перехода от токового сравнения к энергетическому и температурному. Предлагаемая процедура позволяет заранее установить, какие показатели обеспечены измерениями и моделями и где вывод следует ограничить. Её проверка на трёх реализациях остаётся будущим этапом. Снижение энергии потерь или температурного размаха характеризует уменьшение соответствующего воздействия, но не доказывает увеличение ресурса. Для такого вывода необходимы применимая модель повреждения, эксплуатационный профиль и проверка прогноза.

Д. Е. Уткин, Д. И. Рогило
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
Новосибирск, Российская Федерация
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

ФОРМИРОВАНИЕ Au-BLACK ПОКРЫТИЙ

Аннотация. Исследовано формирование покрытий Au-black методом резистивного испарения золота в атмосфере азота с использованием двух независимых источников золота и вольфрама. Показано, что независимое регулирование скоростей испарения позволяет получать пористые покрытия с различным относительным содержанием Au и W, что открывает возможность управления их структурой и свойствами.
Ключевые слова: Au-black, термическое испарение, наноструктурированные покрытия, вольфрам, пористые металлические плёнки.
Для цитирования*:* Уткин Д. Е., Рогило Д. И. Формирование Au-black покрытий // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

D. E. Utkin, D. I. Rogilo
Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

FORMATION OF Au-BLACK COATINGS

Annotation. The formation of Au-black coatings by resistive evaporation of gold in a nitrogen atmosphere using two independent sources of gold and tungsten was investigated. Independent control of the evaporation rates was shown to enable the formation of porous coatings with different relative Au and W contents, thereby providing control over their structure and properties.
Keywords*:* Au-black, resistive evaporation, nanostructured coatings, tungsten, porous metal films.
For citation*:* Utkin D. E., Rogilo D. I. Formation of Au-black coatings // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Известно, что термическое испарение золота и ряда других металлов в разреженной газовой среде (~100 Па) приводит к формированию высокопористых наноструктурированных слоёв за счёт потери кинетической энергии и снижения подвижности частиц при столкновении атомов металла с атомами буферного газа, когда образуются мелкодисперсные кластеры, и последующей их агрегации в рыхлую структуру. Подобные фрактальные покрытия, исторически известные в англоязычной литературе как «металлические сажи» или «дымы» (в частности, «чёрное золото» или Au-black), обладают значительным широкополосным поглощением в видимом и инфракрасном диапазонах спектра.

Формирование наноструктурированного Au-black методом термического испарения золота в атмосфере буферного газа существенно зависит не только от давления в камере, температуры подложки, но и от материала испарителя. При использовании вольфрамовых источников остаточный кислород в камере приводит к образованию оксидов

вольфрама WO_x, инициируя рост пористых фрактальных агрегатов. Напротив, при испарении из неметаллических тиглей при аналогичных давлениях азота, процесс может смещаться в сторону поатомного осаждения, что приводит к формированию плотных отражающих плёнок Au. Для управления указанными эффектами нами был предложен подход, основанный на совместном осаждении металлов из независимых источников. Это позволило раздельно варьировать скорости испарения золота и вольфрама для контролирования стехиометрического соотношения (Au:W) в газовой фазе и на подложке. В результате на подложках кремния (Si) были синтезированы покрытия «чёрного золота» (рис. 1) с развитой пористой морфологией.

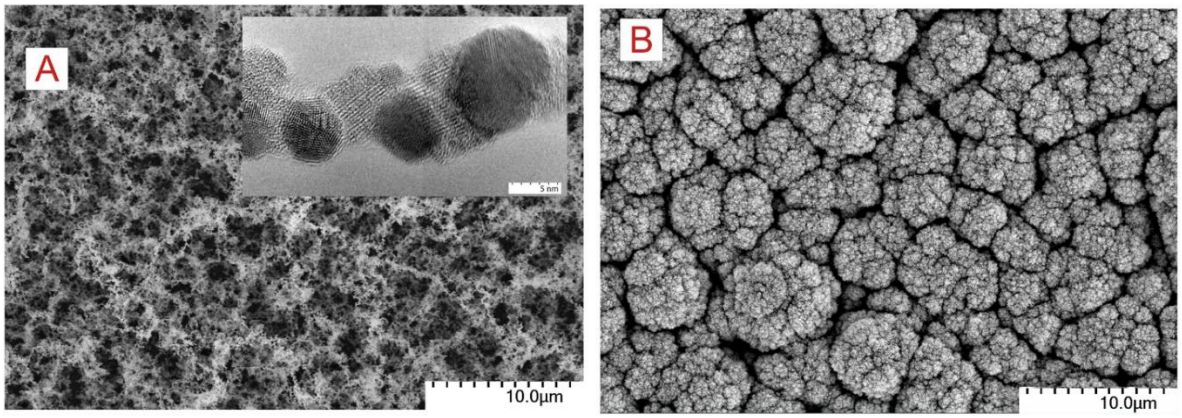


Рис. 1. *СЭМ-изображения покрытий Au-black на поверхности Si, полученных при давлении около 200 Па (A) и около 100 Па (B). На вставке показано ПЭМ-изображение участка фрактальной цепочки с частицами Au/W*

На рис. 2 показаны результаты. полученные с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (EDX), для двух покрытий Au-black с разным содержанием золота и вольфрама, осаждённых на кремниевую подложку.

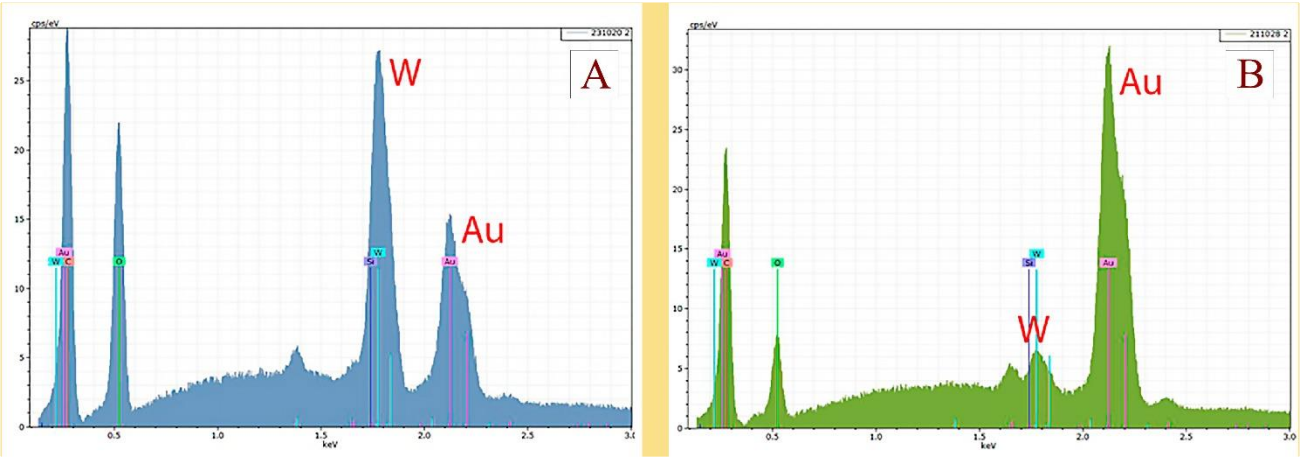


Рис. 2. *EDX-спектры от двух Si образцов, содержащих Au-black покрытия с высоким (A) и низким (B) относительным содержанием вольфрама. Слои осаждались с использованием двух независимых источников Au и W*

Таким образом, использование двух отдельных источников вольфрама и золота позволяет формировать покрытия из черного золота с контролируемым соотношением их количества. Это может быть использовано для применения таких слоёв в качестве антиотражающих (поглощающих) покрытий в электрооптических приборах и сенсорах в видимом и ИК диапазонах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-72-30003).

Авторы благодарят ЦКП «ВТАН НГУ» и ЦКП «Наноструктуры» за технологическую и инструментальную поддержку.

Д. Е. Уткин
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
Новосибирск, Российская Федерация
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРФОРИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛЁНОК МЕТОДОМ ИНВЕРСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ

Аннотация. Исследуется метод формирования перфорированной алюминиевой плёнки с использованием позитивного резиста на основе ПММА, позволяющая отказаться от этапов травления и применения негативных резистов.
Ключевые слова*:* электронная литография, фотоника, плазмоника, ПММА, плёнки.
Для цитирования*:* Уткин Д. Е. Формирование перфорированных алюминиевых плёнок методом инверсной электронно-лучевой литографии // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

D. E. Utkin
Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

INVERSE ELECTRON-BEAM LITHOGRAPHY FOR FABRICATION OF PERFORATED ALUMINUM FILMS

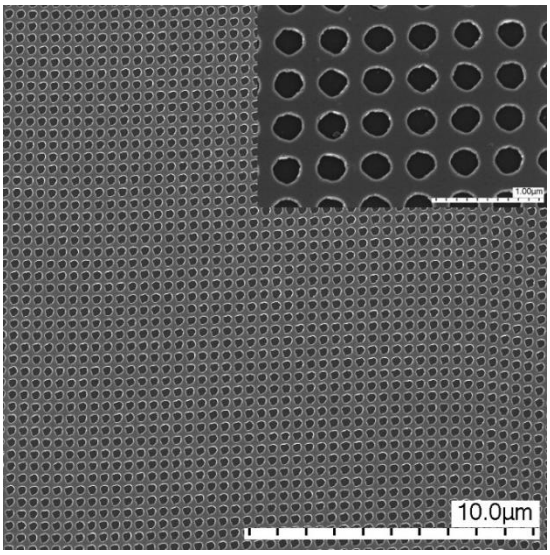
Annotation. This paper investigates a fabrication method for perforated aluminum films using a PMMA-based positive resist, which eliminates etching steps and the use of negative resists.
Keywords*:* Electron-beam lithography, photonics, plasmonics, PMMA, thin films.
For citation*:* Utkin D. E. Inverse electron beam lithography for fabrication of perforated aluminum films // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Современное развитие фотоники и плазмоники требует технологически простых и воспроизводимых методов создания периодических наноструктур. Такие структуры как массивы отверстий, дисков или колец в тонких металлических плёнках позволяют управлять поверхностными плазмон-поляритонами, что может быть использовано для повышения эффективности фотодетекторов, сенсоров, устройств оптической обработки сигналов и т.д.

Наиболее распространённые подходы (литография с последующим травлением или использование негативных резистов) часто требуют сложных технологических режимов для негативных резистов из-за их склонности к набуханию и применения органических растворителей, а также могут иметь ограничения, связанные с селективностью травления металла.

В основе исследуемой методики лежит электронно-лучевая литография с использованием позитивного резиста PMMA 950K толщиной около 200 нм. Экспонирование проводилось при ускоряющем напряжении 20 кВ, апертуре 20 мкм и дозе ~150 мкКл/см^2. Проявление осуществлялось в стандартном растворителе (МИБК:ИПС = 1:3) при комнатной температуре. Сформированный столбчатый рельеф из резиста на поверхности

кремниевой подложки служил обратной маской для термического осаждения Al толщиной 40 нм. На заключительном этапе выполнялась операция lift-off, в результате которой получалась перфорированная металлическая плёнка с массивом отверстий, образующих квадратную решётку (см. рис.). Такой подход исключает необходимость селективного травления металла и не требует применения негативных резистов, что существенно снижает технологические риски, связанные с набуханием и использованием агрессивных органических растворителей. На полученном СЭМ-изображении (вставка на рис.) видно, что размер отверстий составляет около 300 нм (период около 500 нм), однако их форма заметно отклоняется от идеальной окружности.



СЭМ-изображение перфорированной Al плёнки толщиной около 40 нм на поверхности Si подложки в виде (на вставке) квадратной решётки отверстий размером около 300 нм с периодом около 500 нм

Наблюдаемая эллиптичность и шероховатость краёв могут быть объяснены совокупностью факторов, характерных для инверсного режима экспонирования позитивного резиста. К ним относятся: влияние эффектов близости при формировании плотноупакованных периодических структур, приводящее к неоднородности эффективной экспозиционной дозы в областях вокруг PMMA-столбиков; изменение профиля и шероховатость боковых стенок столбиков в ходе проявления, а также частичное переосаждение или «оборачивание» столбиков металлом при осаждении и последующем lift-off. Особенно существенным является влияние эффектов близости при инверсном формировании плотного массива PMMA-столбиков, поскольку экспонируемые области окружают неэкспонируемые элементы малого размера. Практическим следствием является необходимость оптимизации дозы, применения коррекции эффектов близости, а также подбора режимов проявления и осаждения для минимизации деформации и улучшения воспроизводимости формы отверстий.

Разработанный подход обеспечивает формирование перфорированных периодическими отверстиями плёнок Al без использования травления и негативных резистов, позволяя гибко контролировать период и размер отверстий. Экспериментально наблюдаемые отклонения формы отверстий от круговой и повышенная краевая шероховатость требуют дальнейшей оптимизации режимов экспонирования (включая коррекцию эффектов близости), условий проявления и параметров напыления и lift-off.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНВО РФ в рамках госзадания FSUS-2025-0014 ИФП СО РАН.

Экспериментальные исследования проводились с использованием оборудования центров коллективного пользования «ВТАН» НГУ и «Наноструктуры» ИФП СО РАН.

Е. А. Фадина, А. Г. Козлов
Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВЫХ МИКРОЭЛЕКТРОДОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ РАСТВОРОВ

Аннотация. Предложена методика оптимизации геометрических параметров встречно-штыревых микроэлектродов. Наименьшее влияние двойного слоя достигается при отношении зазора к ширине, близком к 1. Оптимальное число электродов на гребёнке составляет 15–20. Результаты применимы при проектировании планарных ячеек для импедансной спектроскопии растворов.
Ключевые слова: встречно-штыревые микроэлектроды, импедансная спектроскопия; постоянная ячейки, двойной электрический слой.
Для цитирования: Фадина Е. А., Козлов А. Г. Оптимизация геометрии встречно-штыревых микроэлектродов, используемых в импедансной спектроскопии растворов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

E. A. Fadina, A. G. Kozlov
Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

OPTIMIZATION OF THE GEOMETRY OF INTERDIGITAL MICROELECTRODES USED IN IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF SOLUTIONS

Annotation. This paper proposes a method for optimizing the geometric parameters of interdigitated microelectrodes. The influence of the double layer is minimized when the ratio of the gap width to the electrode width is close to 1. The optimal number of electrodes per comb is 15–25. These results are applicable to the design of planar cells for impedance spectroscopy of solutions.
Keywords*:* interdigitated microelectrodes, impedance spectroscopy; cell constant, electrical double layer.
For citation*:* Fadina E. A., Kozlov A. G. Optimization of the geometry of interdigital microelectrodes used in impedance spectroscopy of solutions // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Встречно-штыревые микроэлектроды широко используются в электрохимических ячейках для импедансной спектроскопии и измерения удельной проводимости растворов. Однако анализ как российской, так и зарубежной научной литературы показывает, что в настоящее время отсутствуют какие-либо нормативные документы, регламентирующие импедансный контроль жидких веществ с использованием проточных ячеек на основе подобных структур. Большинство авторов при проведении измерений опираются на собственные эмпирические методики. При этом практически отсутствуют систематизированные рекомендации по выбору оптимальных геометрических параметров встречно-штыревых микроэлектродов (ширина штырей, межэлектродный зазор, число штырей) и высоты проточного канала в зависимости от диапазона удельной проводимости и диэлектрической проницаемости контролируемых сред. Вместе с тем у планарных электродов очень низкое отношение сигнал/шум, что требует тщательной оптимизации их геометрии.

Ключевым параметром ячейки с встречно-штыревыми микроэлектродами является постоянная ячейки, связывающая сопротивление раствора R с его удельной прово-

димостью. Целью работы является разработка аналитической модели расчёта постоянной ячейки методом собственных функций и определение на её основе оптимальной геометрии встречно-штыревых микроэлектродов.

Для нахождения постоянной ячейки определялось распределение потенциала в элементарной области ячейки, используя уравнение Лапласа. Решение строилось методом собственных функций с разбиением области на зоны и с использованием разложений в ряды Фурье. На основе найденного распределения потенциала и параметров разработанной эквивалентной электрической схемы вычислялись полный ток системы и постоянная ячейки.

Оптимизация размеров микроэлектродов проводилась в два этапа. На первом этапе анализировалась зависимость отношения верхней и нижней частот Δf от коэффициента металлизации α, который характеризует долю площади поверхности электрода, покрытой металлическим слоем. Установлено, что в пределах диапазона α = 0,3–1 отношение Δf меняется не более чем на 0,5%. Это означает, что в указанном диапазоне выбор α не оказывает существенного влияния на частотные характеристики ячейки. Зависимость отношения Δf от α приведена на рис. 1.

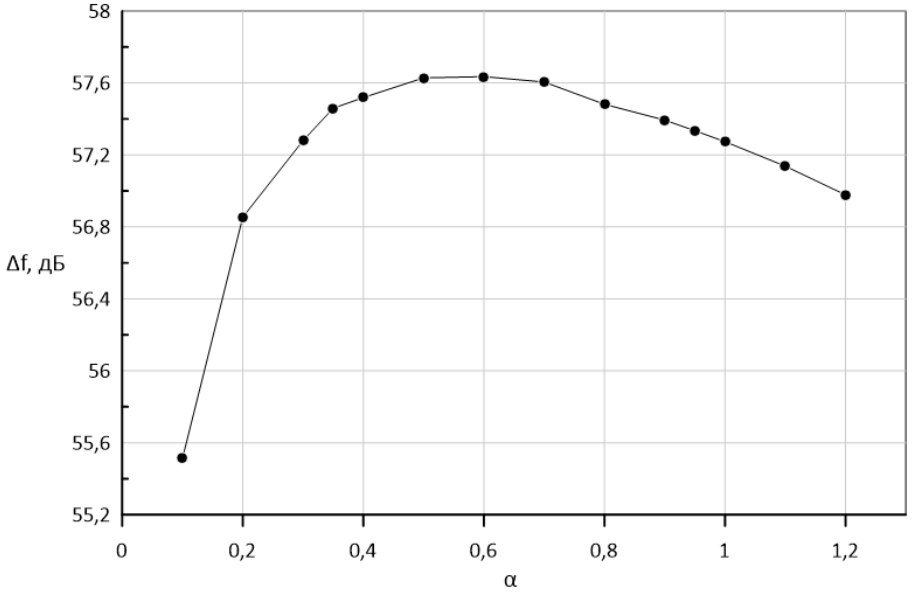


***Рис.1**. Зависимость отношения частот Δf от параметра α для концентрации раствора хлористого калия 0,01 моль/литр*

На втором этапе оптимизация геометрических размеров штырей проводилась исходя из требования ограничения погрешности $\delta_{\text{сре}}$, вносимой двойным электрическим слоем. В качестве критерия использовалась величина относительного вклада импеданса элемента постоянной фазы в сопротивление раствора. Размеры электродов выбирались таким образом, чтобы указанный вклад не превышал заранее заданного допустимого предела. Анализ данных показал, что относительный вклад двойного электрического слоя уменьшается при увеличении отношения ширины зазора к ширине электрода (рис. 2). Наименьшее влияние $\delta_{\text{сре}}$ наблюдается при значениях указанного отношения, близких к 1. Уменьшение периода структуры при фиксированном отношении размеров электродов приводит к возрастанию погрешности.

Оптимизация числа электродов основана на поиске компромисса между чувствительностью ячейки, краевыми эффектами и погрешностью, вносимой двойным электрическим слоем. По результатам моделирования чувствительность ячейки быстро снижается при увеличении числа штырей электродов от N=5 до N=15, после чего уменьшение чувствительности с ростом числа штырей становится более плавным. Одновре-

менно растёт относительный вклад двойного электрического слоя. Теоретически произведение сопротивления раствора на число штырей N должно оставаться постоянным, однако на практике при малых значениях сказываются краевые эффекты. Выбор числа штырей осуществляется по условию, при котором отклонение этого параметра от предельного значения не превышает 2%, что позволяет минимизировать погрешность модели. С учетом того, что дальнейшее увеличение N приводит к нежелательному росту погрешности и снижению чувствительности, оптимальным для одной гребёнки принят диапазон N = 15–20.

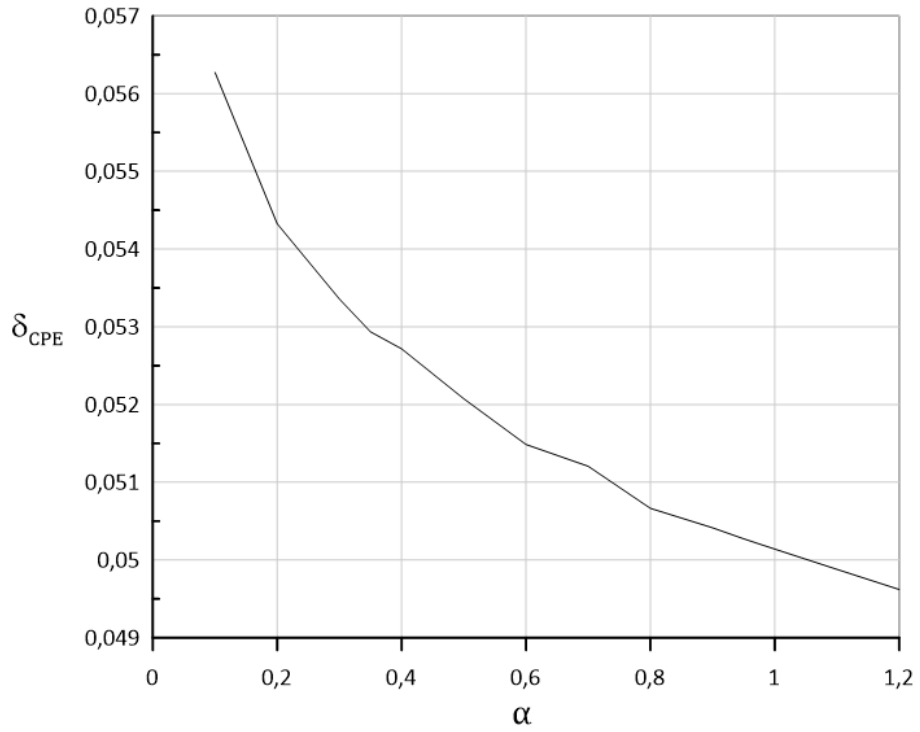


***Рис. 2**. Зависимость погрешности, вносимой двойным электрическим слоем, от параметра α для концентрации раствора хлористого калия 0,01 моль/литр*

Разработанная аналитическая модель на основе метода собственных функций позволяет эффективно рассчитывать постоянную ячейки с встречно-штыревыми микроэлектродами и выполнять оптимизацию их геометрии. Полученные соотношения и рекомендации позволяют существенно снизить погрешности импедансных измерений, компенсировать низкое отношение сигнал/шум планарных структур и повысить точность контроля электрофизических параметров жидких сред. Предложенный подход может быть непосредственно использован при инженерном проектировании и разработке компактных планарных ячеек для импедансной спектроскопии растворов.

С. Д. Ханин[1], Ю. С. Остроумова[2]
[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. профессора М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова
Санкт-Петербург, Российская Федерация

НА ПОДСТУПАХ К ПРОДВИЖЕНИЮ В АКТУАЛЬНЫХ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ВОПРОСАХ ФИЗИКИ МЕТАЛЛООКСИДНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Аннотация. Показываются возможности, которые открывают в разработке актуальных для функциональной электроники вопросов физики металлооксидных диэлектрических пленок расширение арсенала электрофизических методов и изучение представляющих интерес явлений в связи с особенностями структуры этих материалов на соответствующем уровне её организации. Особое внимание, опираясь на опыт изучения диэлектрических пленок оксидов тантала и ниобия, уделяется неупорядоченности структуры, наличию в ней дефектов нестехиометрии и сопряженной с ними случайной структурной неоднородности.
Ключевые слова: аморфные диэлектрические пленки, металлооксиды электропроводность, электрическое разрушение, динамический подход.
Для цитирования: Ханин С. Д. Остроумова Ю. С. На подступах к продвижению в актуальных для функциональной электроники вопросах физики металлооксидных диэлектрических пленок. Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия) Омск : ОНИИП, 2026.

S. D. Khanin[1], Yu. S. Ostroumova[2]
[1]Saint Petersburg University of Telecommunications named after Professor M. A. Bonch-Bruevich
Saint Petersburg, Russian Federation
[2]Military Medical Academy named after S. M. Kirov, Saint Petersburg, Russian Federation

ON THE WAY TO WARD ADVANCING CURRENT ISSUES IN THE PHYSICS OF METAL-OXIDE DIELECTRIC FILMS FOR FUNCTIONAL ELECTRONICS

Annotation. The work demonstrates the possibilities opened up by the development of current issues in the physics of metal-oxide phenomena in metal-oxide dielectric films for functional electronics, the expansion of the arsenal of electrophysical methods, and the study of phenomena of interest with features of structure at the corresponding level of its organization. Special attention, based on the experience of studying dielectric films of tantalum and niobium oxides, is given to structural disorder, the presence of nonstoichiometry defects, and the associated random structural inhomogeneity.
Keywords: amorphous dielectric films metal-oxide films, electrical conductivity, electrical breakdown, dynamic approach.
For citation: Khanin S. D., Ostroumova Yu. S. On the way toward advancing current issues in the physics of metal-oxide dielectric films for functional electronics. Radio Physics, Photonics, and Studies of the Properties of Matter: abstracts of the Fourth International Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia) Omsk : ONIP, 2026.

Исследования в области физики металлооксидных диэлектрических пленок вызваны к жизни главным образом стремлением к улучшению токовых и надежностных характеристик создаваемых на основе этих материалов емкостных элементов. В связи с этим на первый план вышли вопросы физики кинетических явлений в металлооксидах: их электропроводности и электрического разрушения. Со временем интерес к этим вопросам только возрастает, что обусловлено прогрессирующим использованием пленочных металлооксидов в создании базовых элементов электронной базы, таких как МДП-транзисторы, электронные переключатели, элементы памяти.

Несмотря на большой объем выполненных исследований, задача построения физической картины кинетических процессов в металлооксидах, могущей служить прочной основой для принятия продуктивных технологических решений, остается по-прежнему актуальной. Продвижению в этом отношении, как показывает настоящая работа, может способствовать существенное расширение программы экспериментальных исследований кинетических явлений и построение физической картины представляющих интерес явлений на основе модельных предствлений, учитывающих характерные особенности структуры материала на соответствующих уровнях ее организации.

Основанием для выработанных утверждений послужил опыт исследований кинетических свойств диэлектрических пленок оксидов тантала и ниобия в структурах емкостных элементов.

В части установления механизма электропроводности в экспериментальной программе исследований наряду с традиционно используемой вольтамперометрией представляется целесообразным опираться на динамический подход, привлекая методы широкодиапазонной спектроскопии полной проводимости и хроноамперометрии.

Определяемая с помощью первого из указанных методов частотная зависимость динамической проводимости значима в плане различения зонного и прыжкового механизмов электропроводности. Так, обнаруживаемый у изучаемых материалов степенной характер этой зависимости в широком диапазоне частот указывает на прыжковый механизм электропроводности на переменном сигнале. Это объяснимо, учитывая присущую структуре металлооксидов на микроскопическом уровне ее организации неупорядоченность.

Развитым в электронной теории неупорядоченных систем модельным представлением отвечает и наблюдаемая у металлооксидов временная зависимость проводимости на постоянном токе. Достижение при этом статической (квазистационарной) проводимости может трактоваться как перколяционный эффект, возникающий при включении в кластер локализованных состояний, по которым осуществляется транспорт носителей заряда, обладающего минимальной вероятностью критического прыжка.

Следуя теории неупорядоченных систем, удается изыскать возможности получения ответов и на другие принципиально важные в плане установления механизма электропроводности вопросы относительно причин локализации и природы носителей заряда. Информативными здесь являются зависимости статической и динамической проводимости от напряженности постоянного электрического поля. Обнаруживаемое в сильных электрических полях начальное уменьшение проводимости с увеличением напряженности поля, как это имеет место у изучаемых материалов, сигнализирует о сильной, обусловленной электрон-фононным взаимодействием локализации и с большой вероятностью о формировании поляронов малого (сверхмалого, сравнимого с амплитудой тепловых колебаний структурных частиц) размера.

Другим указанием со стороны эксперимента на сильную электрон-фононную связь является отвечающий развитым в работе модели сдвиг верхней границы интервала частот, в котором наблюдается указанный нелинейный эффект, с увеличением температуры в сторону более высоких частот.

Еще одной особенностью структурной организации металлооксидов на микроскопическом уровне, оказывающей противонаправленное неупорядоченности влияние на электроизоляционные свойства, является наличие дефектов присущей изучаемым материалам нестехиометрии состава типа кислородных вакансий.

С целью детализации модельных представлений о таких дефектах может быть использован метод фотоэлектронной спектроскопии. Получаемые для плёночных оксидов тантала и ниобия спектры остовных электронов последних свидетельствуют о возникновении при отклонении состава от стехиометрического катионов металла в непредельной степени окисления. С увеличением их концентрации происходит экспоненциально сильное возрастание электронной проводимости, что позволяет рассматривать эти дефекты как центры локализации носителей заряда.

На мезоскопическом уровне организации структуры металлооксидов важную роль в формировании кинетических свойств играет сопряженная с неупорядоченностью структуры и наличием в ней дефектов нестехиометрии случайная структурная неоднородность. Наличие последних ведет к образованию каналов длиннопробежной диффузии поступающих в пленку из контактирующего с ней в емкостных элементах водосодержащего проводящего вещества ионов.

Роль такой неоднородности прослеживается в токопрохождении при приложении к конденсаторной системе обратного напряжения. В этом режиме нагружения, как показывают полученные с помощью ядерно-физических методов результаты анализа состава данные, происходит инжекция в оксид водородосодержащих ионов, что в совокупности с происходящим при этом частичным восстановлением оксида, приводит к резкому увеличению электрической проводимости и в значительной степени предопределяет присущую оксидным конденсаторам полярность.

Ионный транспорт – не только структурнозависимый, но и структурообразующий процесс. В рассматриваемом режиме нагружения это проявляется в обнаруживаемой термической кристаллизации оксида, происходящей, по-видимому, в каналах с высокой плотностью тока.

Неравновесное структурообразование имеет место и при длительном электротепловом нагружении металлооксидной структуры в нормальном для оксидных конденсаторов режиме. Образование при этом так называемых полевых кристаллов, как показано посредством структурных исследований, обусловлено транспортом поставляемых в оксид кислородосодержащих ионов. О важной роли каналов длиннопробежной диффизии ионов здесь свидетельствует соответствие экспериментально полученной временной зависимости степени кристалличности пленки модели двумерного роста кристаллов на заданном числе центров.

С отмеченным изменением структуры оксидной пленки на макроскопическом уровне ее организации происходит возрастание тока утечки емкостных элементов, приводящее к преждевременным их отказам.

Технологическая модификация выявленных в исследованиях предлагаемым образом факторов формирования кинетических свойств металлооксидов может позволить достичь значимых для функциональной электроники практических результатов.

В. Р. Шаяпов, С. Ю. Чепкасов, А. Л. Богословцева, П. В. Гейдт
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛАЗМЫ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

Аннотация. Исследованы эмиссионные спектры плазмы при импульсном DC магнетронном распылении мишени алюминия в среде азота с целью получения пленок нитрида алюминия. При записи спектров варьировались мощность питания магнетрона, концентрация азота в газовой смеси $Ar+N_2$ и суммарный поток этой смеси. Полученные закономерности в изменении относительных интенсивностей обнаруженных на спектрах линий и полос сопоставлены с характеристиками пленок (скорость роста, механические напряжения).
Ключевые слова: нитрид алюминия, магнетронное распыление, оптическая эмиссионная спектроскопия, плазма.
Для цитирования: Шаяпов В. Р., Чепкасов С. Ю., Богословцева А. Л., Гейдт П. В. Оптическая эмиссионная спектроскопия плазмы при магнетронном распылении пленок нитрида алюминия // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

V. R. Shayapov, S. Yu. Chepkasov, A. L. Bogoslovtseva, P. V. Geydt
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY DURING MAGNETRON SPUTTERING OF ALUMINIUM NITRIDE FILMS

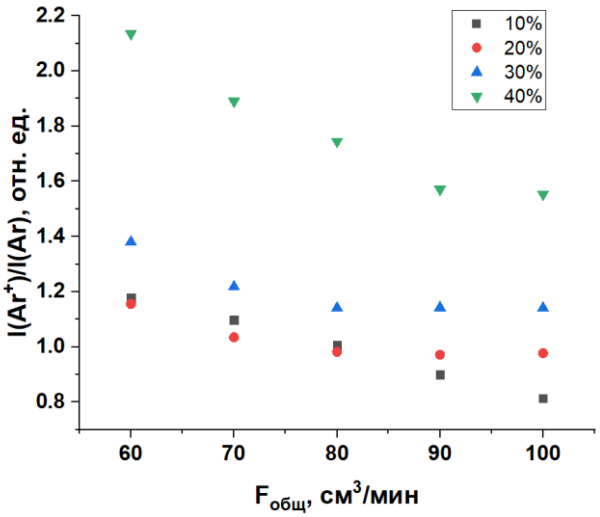
Annotation. The paper investigates the emission spectra of plasma during pulsed DC magnetron sputtering of an aluminum target in a nitrogen environment to obtain aluminum nitride films. When recording the spectra, the magnetron power, the nitrogen concentration in the $Ar+N_2$ gas mixture, and the total flow rate of this mixture were varied. The obtained patterns in the variation of the relative intensities of the lines and bands detected in the spectra are compared with the characteristics of the films (growth rate, mechanical stresses).
Keywords: aluminum nitride, magnetron sputtering, optical emission spectroscopy, plasma.
For citation: Shayapov V. R., Chepkasov S. Yu., Bogoslovtseva A. L., Geydt P. V. Optical emission spectroscopy during magnetron sputtering of aluminium nitride films // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС) широко применяется в исследовании плазменных процессов роста пленок, включая плазмохимическое осаждение из газовой фазы, плазменное электролитическое оксидирование, дуговое распыление, магнетронное распыление. ОЭС обычно применяется непосредственно во время роста пленок (*in situ*) для установления химического состава плазмы. Особенностью ОЭС является возможность регистрации только наиболее простых частиц плазмы: свободных атомов, ионов, двух- или трехатомных молекул, молекулярных ионов и свободных радикалов. Такие частицы играют важнейшую роль в процессах магнетронного распыления, поэтому применение ОЭС для их исследования рационально и актуально.

В данной работе проведено исследование методом ОЭС процессов реактивного магнетронного распыления пленок нитрида алюминия. Пленки нитрида алюминия осаждались методом импульсного магнетронного распыления постоянного тока путем распыления мишени алюминия в газовой смеси аргона и азота. Температура осаждения со-

ставляла 200 и 300 °C. Во время осаждения пленок состав плазмы магнетронного разряда определялся с применением оптического спектрометра «Колибри-2», работающего в спектральном диапазоне 443-913 нм (разрешение 0,4 нм). Осаждение пленок с одновременной записью эмиссионных спектров плазмы проводилось при изменении мощности магнетрона и параметров газовой смеси, вводимой в реактор. Концентрация азота в смеси $Ar+N_2$ задавалась равной 10, 20, 30 и 40 %. Суммарный поток $Ar+N_2$ устанавливался на уровне 60-120 см^3/мин с шагом 10 см^3/мин. Мощность магнетрона задавалась на уровне 150 и 300 Вт, а также проведена отдельная серия экспериментов при мощности магнетрона 100-600 Вт с шагом 50 Вт при концентрации азота 20% и общем потоке 100 см^3/мин.

В плазме магнетронного разряда при всех применяемых условиях процесса обнаружены следующие частицы: нейтральный атом Ar, нейтральный атом Al, нейтральный атом N, однократно заряженный ион Ar^+, нейтральная молекула N_2, молекулярный ион N_2^+. Интенсивность атомных линий и молекулярных полос этих частиц менялась при изменении условий процесса. В качестве характеристических величин, определяющих уровень атомизации и ионизации плазмы, использовались относительные интенсивности $Ar+/Ar$, N/N_2, ион N_2^+/N_2. При увеличении мощности магнетрона относительные величины $Ar+/Ar$ и N/N_2 монотонно растут, но значение N_2^+/N_2. практически не меняется, то есть увеличение мощности способствует ионизации аргона и диссоциации молекул азота, но не влияет на степень ионизации молекул азота. Зависимости величины $Ar+/Ar$ от общего потока $Ar+N_2$ для разных концентраций азота указывает на уменьшение степени ионизации аргона по мере увеличения общего потока (см. рис.). Аналогично ведет себя отношение N_2^+/N_2, отвечающее за ионизацию молекулы азота. Это указывает на подавление ионизации с ростом давления в камере распыления из-за уменьшения длины свободного пробега ионов и уменьшения их кинетической энергии. Эти закономерности качественно повторяют зависимости скорости роста пленок от общего потока $Ar+N_2$. Механические напряжения сжатия в пленках уменьшаются с ростом общего потока, то есть оптимальные режимы для осаждения пленок с малыми напряжениями соответствуют потоку 100 см^3/мин.



Зависимости отношения интенсивности линии иона к интенсивности линии нейтрального атома аргона от суммарного потока $Ar+N_2$ для разных концентраций азота

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSUS-2024-0020).

Изготовление и изучение свойств образцов выполнены в АТИЦКП НГУ.

А. Г. Антонян, А. А. Маликов, В. И. Казаков
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ В ПРОЦЕССЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ БЕССЕЛЬ-ГАУССОВА ПУЧКА

Аннотация. Экспериментально исследованы процессы формирования и пространственной трансформации Бессель-Гауссова пучка в оптической схеме с двумя аксиконами, фокусирующей линзой и расширяющим объективом с настраиваемым фокусным расстоянием. Рассмотрено влияние геометрических параметров схемы на пространственные характеристики. Получены экспериментальные зависимости профиля пучка от расстояния до экрана, проведено сравнение с гауссовым пучком.
Ключевые слова: акустооптика, аксикон, диафрагма, управление пучком.
Для цитирования: Антонян А. Г., Маликов А. А., Казаков В. И. Исследование процесса формирования и пространственной эволюции в процессе распространения Бессель-Гауссова пучка // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. G. Antonyan, A. A. Malikov, V. I. Kazakov
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Saint Petersburg, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE FORMATION AND SPATIAL EVOLUTION PROCESS DURING THE PROPAGATION OF A BESSEL-GAUSSIAN BEAM

Abstract. An experimental study of the formation and spatial transformation of a Bessel-Gaussian beam was performed using an optical scheme with two axicons, a focusing lens and an expanding objective with an adjustable focal length. The influence of the geometric parameters of the scheme on the beam profile and spatial position was analyzed. Experimental beam-profile dependences on the distance to the screen were obtained and compared with a Gaussian beam.
Keywords*:* acousto-optics, axicon, diaphragm, beam control.
For citation*:* Antonyan A. G., Malikov A. A., Kazakov V. I. Investigation of the formation and spatial evolution process during the propagation of a Bessel-Gaussian beam // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Бессель-Гауссовы (БГ) пучки малокольцевого типа характеризуются подавленной дифракционной расходимостью, высокой осевой симметрией и способностью к самовосстановлению пространственного профиля после прохождения препятствий. Эти свойства делают их перспективными для беспроводной оптической связи, лидарных систем, дистанционной лазерной спектроскопии и обработки материалов.

Формирование и иследование пучка выполнялось на основе схемы с двумя аксиконами и фокусирующей линзой (рис. 1). Исходный гауссов пучок лазера направлялся на первый аксикон, после чего проходил второй аксикон. Пара аксиконов формировала кольцевое световое поле, которое собиралось линзой и преобразовывалось в квазибездифракционный Бессель-Гауссов пучок. Регистрация распределения интенсивности выполнялась с помощью ПЗС-линейки в координатной плоскости экрана, перемещаемом вдоль оптической оси.

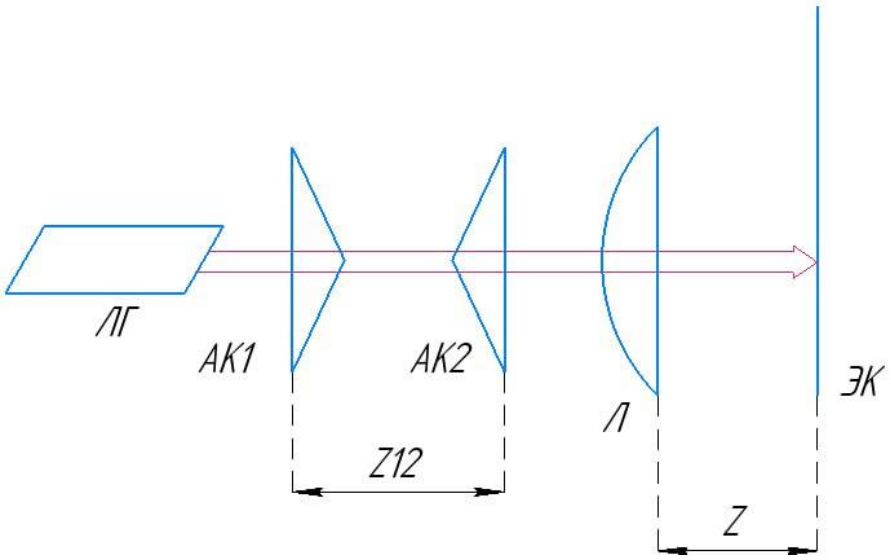


Рис. 1. *Оптическая схема формирования Бессель-Гауссова пучка с двумя аксиконами и фокусирующей линзой*

При численном моделировании использовалось асимптотическое представление светового поля на экране, позволяющее рассматривать распределение интенсивности в различных пространственных сечениях. В расчётной модели учитывались длина волны излучения (λ), показатель преломления (n′) и поглощение среды (n″), угол конусности аксиконов, фокусное расстояние линзы (f), расстояние между аксиконами (z_{12}), расстояние от линзы до экрана (z) и полуширина исходного гауссова пучка (w_0). Для воздуха принимались $n' \approx 1$ и $n'' << 1$, поэтому влияние поглощения считалось малым.

Для моделирования выбраны параметры f = 1 м, z_{12} = 12 см, угол конусности аксиконов 5°, w_0 = 3 мм и длина волны λ = 532 нм. Расчёт выполнялся для ближней и дальней зон при разных расстояниях от оптической системы до экрана. В дальней зоне анализировалось изменение радиального распределения относительной интенсивности при увеличении расстояния, а вблизи оси пучка - зависимость интенсивности от координаты z и изменение характеристик при различных фокусных расстояниях линзы. Такой подход позволил оценить, как параметры оптической системы определяют положение и форму сформированного светового поля.

Экспериментальная установка включала лазер с длиной волны 532 нм, диафрагму, расширяющий объектив с настраиваемым фокусным расстоянием, два аксикона с углом конусности 5°, фокусирующую линзу с f = 115 мм и ПЗС-измерительную систему. Диафрагма использовалась для сужения пучка и точной юстировки оптической оси, а расширяющий объектив обеспечивал регулирование диаметра пучка перед аксиконами. Расстояние между аксиконами составляло 100 мм. После прохождения первого и второго аксиконов формировалось узкое кольцевое световое поле, которое собиралось фокусирующей линзой и преобразовывалось в квазибездифракционный пучок. Зеркало изменяло направление распространения излучения и выводило его на измерительную систему.

Профиль сформированного пучка измерялся на расстояниях 65, 185, 300 и 550 см от элементов формирования. На тех же расстояниях выполнялись измерения исходного гауссова пучка без оптической схемы, что обеспечило возможность непосредственного сравнения пространственной эволюции двух вариантов излучения. После регистрации сигналов проводилась обработка экспериментальных данных, расчёт параметров пучка и построение зависимостей, характеризующих изменение профиля при распространении.

Полученные экспериментальные зависимости представлены для ближней и дальней зон (рис. 2 и 3). В ближней зоне исследовались изменения характерных параметров гауссова профиля и смещения ΔX. При переходе к дальней зоне сравнивались параметры гауссова и аксиконного формирований при увеличении расстояния *L*. Результаты показывают, что пространственная структура излучения существенно зависит от расстояния распространения и геометрических параметров оптической схемы. При изменении положения измерительной плоскости изменяются как размерные характеристики профиля, так и положение его характерных элементов.

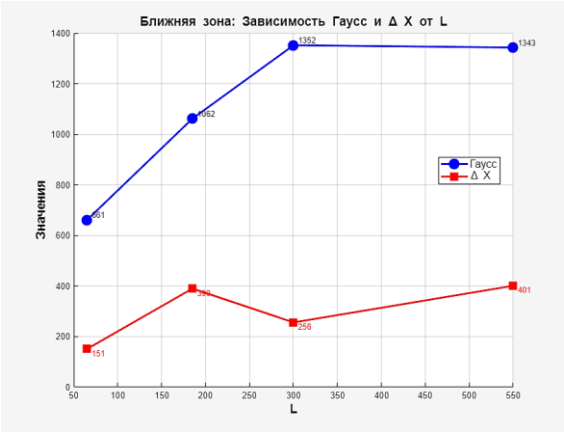


Рис. 2. *Ближняя зона: зависимость параметров гауссова пучка и ΔX от расстояния L*

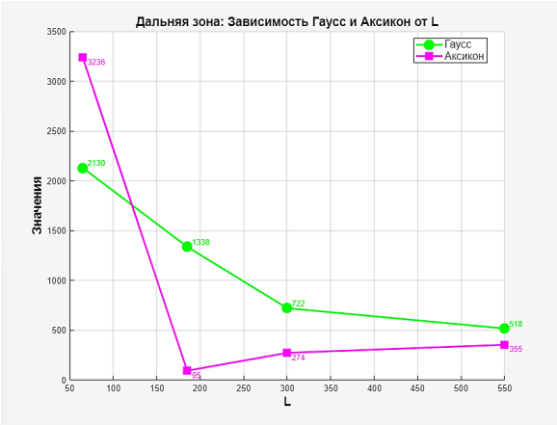


Рис. 3. *Дальняя зона: зависимость параметров гауссова и аксиконного формирований от расстояния L*

Сопоставление расчётных и экспериментальных подходов позволяет рассматривать пространственное распределение интенсивности как результат совместного действия параметров аксиконов и фокусирующей оптики. При этом изменение расстояния между оптической системой и экраном непосредственно отражается на наблюдаемом профиле, поэтому последовательная регистрация в нескольких сечениях позволяет проследить трансформацию сформированного пучка. Использование исходного гауссова пучка в качестве сравнения дополнительно выделяет особенности, возникающие именно вследствие преобразования аксиконами.

Таким образом, исследованная схема позволяет формировать Бессель-Гауссов пучок и управлять его пространственными характеристиками изменением геометрических параметров системы и фокусного расстояния объектива. Экспериментальные измерения на расстояниях до 5,5 м подтвердили возможность регистрации пространственной эволюции сформированного пучка и выявили различия его поведения относительно исходного гауссова излучения. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшем исследовании методов управления положением, формой и пространственным сканированием квазибездифракционных лазерных пучков.

Работа выполнена в рамках проекта, реализуемого совместно образовательными и научными организациями Санкт-Петербурга и Республики Беларусь, грант № 25-РБ-09-14.

Е. И. Богданова, Т. Г. Никулина, М. В. Дашков
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
Самара, Российская Федерация

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Аннотация. Выполнено исследование характеристик оптических волокон различных производителей с учетом экспериментально измеренных профилей показателя преломления. На основе полученных результатов определено, что различия профилей показателя преломления волокон необходимо учитывать при моделировании процессов распространения оптического излучения, оценке модовых характеристик и расчете дополнительных потерь, обусловленных механическими воздействиями на оптическое волокно.
Ключевые слова*:* оптическое волокно, профиль показателя преломления, радиус изгиба, одномодовое волокно, оптический тракт, оптические потери.
Для цитирования*:* Богданова Е. И., Никулина Т. Г., Дашков М. В. Анализ характеристик оптических волокон различных производителей на основе результатов измерения профиля показателя преломления // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

E. I. Bogdanova, T. G. Nikulina, M. V. Dashkov
Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF OPTICAL FIBERS FROM DIFFERENT MANUFACTURERS BASED ON REFRACTIVE INDEX PROFILE MEASUREMENTS

Abstract. The study investigates the characteristics of optical fibers from different manufacturers, taking into account experimentally measured refractive index profiles. Based on the obtained results, it was found that differences in the refractive index profiles of optical fibers should be considered when modeling optical radiation propagation, evaluating modal characteristics, and calculating additional losses caused by mechanical effects on the optical fiber.
Keywords*:* optical fiber, refractive index profile, bending radius, single-mode fiber, optical link, optical losses.
For citation*:* Bogdanova E. I., Nikulina T. G., Dashkov M. V. Analysis of the characteristics of optical fibers from different manufacturers based on refractive index profile measurements // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

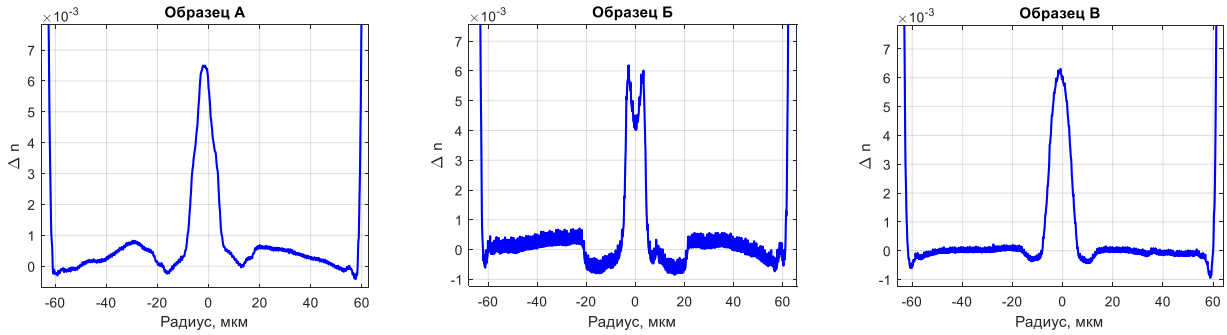
Современные радиофотонные системы используют оптическое волокно в качестве среды передачи высокочастотных аналоговых и цифровых сигналов. При этом характеристики оптического волокна непосредственно влияют на амплитудные, фазовые и частотные параметры передаваемого сигнала и, как следствие, на итоговое качество функционирования тракта. Оптические волокна различных производителей, соответствующие одной и той же рекомендации МСЭ-Т, удовлетворяют установленным нормативным требованиям, однако при этом в документах, как правило, приводится достаточно широкий диапазон значений и установленных допусков. В результате конкретные марки оптического волокна могут заметно отличаться по ряду параметров, таких как диаметр

поля моды, длины волны отсечки, спектральная зависимость коэффициента хроматической дисперсии, прирост затухания на макроизгибах. В значительной степени данные параметры определяются фактическим распределением показателя преломления по сечению оптического волокна. При этом данная характеристика не регламентируется нормативно-технической документацией и не отображается в технической документации производителя.

В связи с этим для ряда задач представляет интерес определение характеристик оптических волокон различных производителей, относящихся к одной рекомендации МСЭ-Т, на основе экспериментально измеренных профилей показателя преломления.

В данной работе измерения производились с использованием метода преломления в ближнем поле, регламентированного в рекомендациях МСЭ-Т. Для анализа были выбраны образцы оптических волокон, соответствующих рекомендациям МСЭ-Т G.652.D/G.657.A1. В данном типе оптических волокон совмещаются свойства стандартного одномодового волокна относительно параметров передачи и потерь при сращивании и улучшенной стойкостью к изгибам. Предварительные измерения показали, что представленные в настоящее время на рынке оптические волокна подобного типа могут иметь значительные отличия по уровню вносимого затухания на изгибах.

На рисунке представлены результаты измерения профиля показателя преломления для трех марок оптического волокна. Полученные данные предварительно обрабатывались для удаления инструментальный артефактов, связанных с особенностью процесса измерения и пересчета относительно опорного значения показателя преломления.



Профили показателя преломления образцов оптических волокон рекомендации G.652.D/G.657.A1 различных производителей

Итоговые профили далее использовались для выполнения модового анализа на основе метода конечных элементов. В результате определялись значения постоянной распространения для заданного диапазон длин и рассчитывались дисперсионные характеристики, рассчитывалась спектральная зависимость диаметра поля моды и определялась длина волны отсечки. По результатам расчета производилась оценка зависимости потерь при макроизгибах от длины волны и радиуса изгиба. Разработанная методика анализа и полученные результаты представляют практический интерес проектировании и эксплуатации волоконно-оптических линий связи и радиофотонных трактов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №26-29-20121, https://rscf.ru/project/26-29-20121/ и при финансовой поддержке Самарской области в лице автономной некоммерческой организации «Дирекция межвузовского кампуса Самарской области».

Л. И. Вострикова, И. А. Карташев
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
Новосибирск, Российская Федерация

ФАЗОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ ПРИ СОЗДАНИИ ОБЪЁМНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ПОЛИНГОМ ФОТОИНТЕГРИРОВАННЫХ МИКРОРЕШЁТОК АНИЗОТРОПИИ

Аннотация. На диаграммах нелинейных взаимодействий при объёмном оптическом полинге показаны фазовые корреляции для процессов брегговской дифракции и генерации второй гармоники. Показана их зависимость от дисперсии среды при разных длинах волн лазерных излучений и обнаружена возможность двухканального отклика. При учёте тензорного вида фотоинтегрированных микрорешёток анизотропии по нелинейной поляризуемости результаты экспериментов в силикатных образцах находятся в согласии с теорией.
Ключевые слова: полинг, фотоинтегрирование, анизотропия, микрорешётки, корреляции.
Для цитирования: Вострикова Л. И., Карташев И. А. Фазовые корреляции при создании объёмным оптическим полингом фотоинтегрированных микрорешёток анизотропии // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

L. I. Vostrikova, I. A. Kartashev
Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

PHASE CORRELATIONS UPON CREATING PHOTOINTEGRATED MICROLATTICES OF ANISOTROPY BY VOLUMETRIC OPTICAL POLING

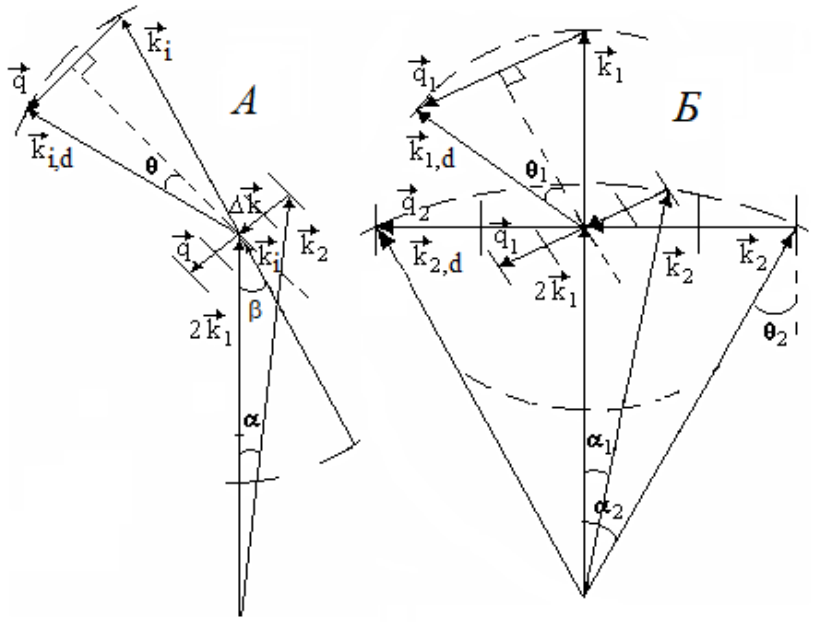
Abstract. The diagrams of nonlinear interactions during volumetric optical poling show phase correlations for the processes of Bragg diffraction and second-harmonic generation. Their dependence on the medium's dispersion is demonstrated at different wavelengths of laser radiation, and the possibility of a two-channel response is revealed. When taking into account the tensor form of the anisotropy of photo-integrated microlattices in part of nonlinear polarizability, the experimental results in silicate samples are in agreement with the theory.
Keywords: poling, photo-integration, anisotropy, microlattices, correlations.
For citation: Vostrikova L. I., Kartashev I. A. Phase correlations upon creating photo-integrated microlattices of anisotropy by volumetric optical poling // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В работе исследована возможность получения фазовых корреляций при формировании в синтезированных стеклянных образцах максимально однородно распределённых фотоинтегрируемых микрорешёток анизотропии в условиях объёмного оптического полинга. Показана зависимость фазовых корреляций от дисперсии среды при разных длинах волн взаимодействующих лазерных излучений. Проанализированы варианты нормальной и аномальной дисперсии. На рисунке приведены примеры характерных диаграмм фазовых согласований для регистрации максимальных сигналов селективной брэгговской дифракции от разных фотоинтегрируемых микрорешёток анизотропии. При автоматической перестройке углового синхронизма продемонстрирована возможность организации режима одновременной двухканальной самодифракции поляризующих излучений, которую можно наблюдать в образцах с длительным временем хранения фотоингегрируемых микрорешёток в условиях аномальной дисперсии и

вблизи полос поглощения в среде.

Выполнены также теоретические расчёты пространственных картин для нелинейных взаимодействий лазерных излучений внутри фотоинтегрированной анизотропии при объёмном оптическом полинге. Показано, что фотоинтегрируемые микрорешётки анизотропии во втором нелинейном порядке по наведённой поляризуемости имеют явно выраженный тензорный вид с отличающимися показателями по двум выделенным направлениям. В отличие от коллинеарного варианта полинга, характерного для стекловолокон, при объёмном оптическом полинге картина пространственных распределений перемещённых зарядов видоизменяется из-за появления составляющей когерентного фотогальванического тока, перпендикулярной плоскостям микрорешётки. В результате происходит и перераспределение нелинейно-оптического отклика от фотоинтегрируемых микрорешёток по разным тензорным направлениям.

Для оптимизации нелинейно-оптического процесса генерации второй гармоники в экспериментах, при учёте характерной дисперсии и тензорного вида анизотропии в разных по химическому составу силикатных стёклах, для каждого отдельного образца проводились оценки фазовых согласований в условиях объёмного оптического полинга. Полученные экспериментальные результаты по показателям синфазности отклика, тензорным и другим исследованным характеристикам нелинейно-оптического процесса генерации второй гармоники хорошо согласуются с теоретическими закономерностями. Результаты исследований могут быть полезны в дальнейшем при разработке на основе фотоинтегрированных микрорешёток анизотропии новых миниатюрных элементов для преобразователей разных длин волн видимого и инфракрасного спектра оптических сигналов в электронике и радиотехнике.



Диаграммы фазовых согласований при нормальной дисперсии:
А – для брэгговской дифракции излучения произвольной частоты с волновым вектором k_i,
Б – для брэгговской самодифракции полингующих излучений с волновыми векторами k_1 и k_2
(q, q_1, q_2 – обратные вектора фотоинтегрируемых
при объёмном оптическом полинге микрорешёток анизотропии)

Работа выполнена в рамках госзадания FWGW-2025-0019.

Н. В. Горбачев, А. Б. Клещенков
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ПОТЕРИ ВВОДА В ПЛАЗМОННЫЙ ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ: СОЕДИНЕНИЕ ВСТЫК, СТУПЕНЧАТЫЙ И ПЛАВНЫЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ

Аннотация. Исследованы потери ввода излучения из кремниевого волновода в плазмонный фазовращатель при различных профилях топологий перехода. Сопоставлены соединение встык, ступенчатый и плавный переходы одинаковой длины. Показано, что плавность профиля сама по себе потерь не снижает: их определяет длина участка, где поле перестраивается от диэлектрического к плазмонному, а затухание моды возрастает примерно в десять раз относительно регулярной линии. Расчет показал, что потери определяет не длина перехода сама по себе, а то, какая её часть проходит через область перестройки моды.
Ключевые слова: плазмонный волновод, фазоизменяемый материал, фазовращатель, ввод излучения, ступенчатый переход, плавный переход, собственные моды, интегральная фотоника.
Для цитирования: Горбачев Н. В., Клещенков А. Б. Потери ввода в плазмонный фазовращатель: соединение встык, ступенчатый и плавный металлические переходы // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

N. V. Gorbachev, A. B. Kleshchenkov
Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

COUPLING LOSS INTO A PLASMONIC PHASE SHIFTER: BUTT JOINT, STEPPED AND SMOOTH METAL TRANSITIONS

Abstract. Coupling losses from a silicon waveguide into a plasmonic phase shifter are usually reduced by a long smooth transition. A butt joint, a stepped and a smooth transition are compared at equal length. Smoothness alone does not reduce the loss: it is governed by the fraction of the length where the field is transformed from dielectric to plasmonic, while the local mode attenuates about ten times faster than the working mode. According to the calculation, losses are determined not by the length of the transition itself, but by the part of the length that passes through the mode-transformation region.
Keywords: plasmonic waveguide, phase-change material, phase shifter, light coupling, stepped transition, smooth taper, eigenmodes, integrated photonics.
For citation: Gorbachev N. V., Kleshchenkov A. B. Coupling loss into a plasmonic phase shifter: butt joint, stepped and smooth metal transitions // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Энергонезависимый плазмонный фазовращатель на материале с фазовым переходом работает в интегральной схеме вместе с пассивным кремниевым волноводом, поэтому потери на переходе между ними входят в общие потери прибора наравне с потерями активного участка. Потери перехода обычно снижают плавным изменением поперечного сечения волновода вдоль направления распространения, однако при наличии металла, который входит в состав плазмонного фазовращателя, увеличение длины перехода может сопровождаться дополнительным поглощением.

Цель работы – сравнить соединение встык, ступенчатый и плавный переходы при одной длине и установить факторы, определяющие их параметры.

Фазовращатель образован буферным слоем сульфида сурьмы толщиной 120 нм на подложке из диоксида кремния, полоской золота толщиной 10 нм и кремниевым гребнем шириной 450 нм. Структура исследована для длины волны 1,55 мкм. Подводящий диэлектрический кремниевый волновод расположен на том же буферном слое (рис. 1*а*).

Сравнивались соединение встык, ступенчатый переход и плавный переход, образованный плавно изменяющейся по ширине металлической полоской, при одинаковой длине перехода (рис. 1*б*, *в*) по мощности, прошедшей через общее контрольное сечение. Прохождение мощности через переход рассчитано в трёхмерной модели методом конечных элементов, собственные моды промежуточных сечений – в двумерной.

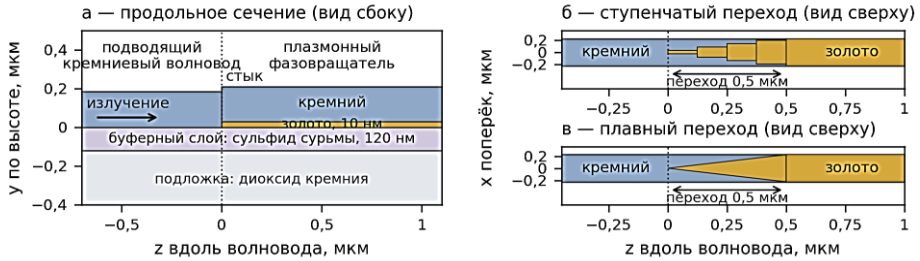


Рис. 1. *Стык кремниевого волновода с плазмонным фазовращателем:*
а – продольное сечение (толщина золота увеличена);
б, в – вид сверху при ступенчатом и плавном переходах длиной 0,5 мкм

Соединение встык на общем буферном слое даёт ослабление прошедшей мощности 2,75 дБ. При сохранении вертикальной ступеньки 120 нм ослабление увеличивается до 3,69 дБ. Для плавного металлического профиля увеличение длины приводит к росту потерь: 2,59 дБ при длине 0,5 мкм, 2,65 дБ при 1 мкм и 2,83 дБ при 2 мкм.

Исследование различных профилей плавного перехода одной длине показывает разброс результата 0,44 дБ. Ступенчатый переход из четырёх ступеней даёт результат, сопоставимый с результатами переходов с плавным профилем.

Расчёт собственных мод промежуточных сечений показывает наличие узкого диапазона ширин металлической полоски, в котором происходит переход от диэлектрической моды к плазмонной. В этой области затухание моды возрастает примерно в десять раз относительно рабочего значения волновода (рис. 2).

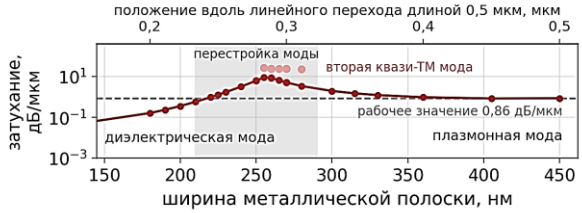


Рис. 2. *Затухание собственной моды при распространении вдоль плавного перехода;*
верхняя ось – положение сечения вдоль линейного перехода длиной 0,5 мкм

Оценка потерь мощности на переходе, проведенная двумерным расчетом, совпадает с оценкой, полученной в трехмерной модели, с точностью до 0,2 дБ. Расчеты выполнены методом конечных элементов. Трёхмерный расчёт двух плавных переходов одинаковой длины, различающихся только распределением длины внутри области перестройки, подтвердил этот вывод: потери различаются на 0,5 дБ.

Показано, что увеличение плавности металлического перехода само по себе не обеспечивает снижения потерь. Для исследованных структур определяющим фактором является протяжённость участка, в котором собственная мода изменяет характер и имеет повышенное затухание. Снижение потерь требует уменьшения длины перехода в области перестройки моды, а не простого увеличения плавности профиля.

В. В. Давыдовская, В. Н. Навныко, А. В. Федорова
Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина
Мозырь, Республика Беларусь

АДРЕСНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДВУМЕРНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ BSO И BTO ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ И ВНЕШНИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Аннотация. Методом численного моделирования изучена адресная локализация двумерных световых пучков в фоторефрактивных кристаллах BSO и BTO при управлении поляризацией и внешним электрическим полем. Рассмотрено взаимодействие ортогонально поляризованных пучков с учётом оптической активности.
Ключевые слова: фоторефрактивные кристаллы, адресная локализация световых пучков, ортогонально поляризованные пучки, оптическая активность, внешнее электрическое поле, кристаллы BSO и BTO, численное моделирование.
Для цитирования: Давыдовская В. В., Навныко В. Н., Федорова А. В. Адресная локализация двумерных световых пучков в фоторефрактивных кристаллах BSO и BTO при управлении поляризацией и внешним электрическим полем // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

V. V. Davydovskaya, V. N. Naunyka, A. V. Fedorova
Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Mozyr, Republic of Belarus

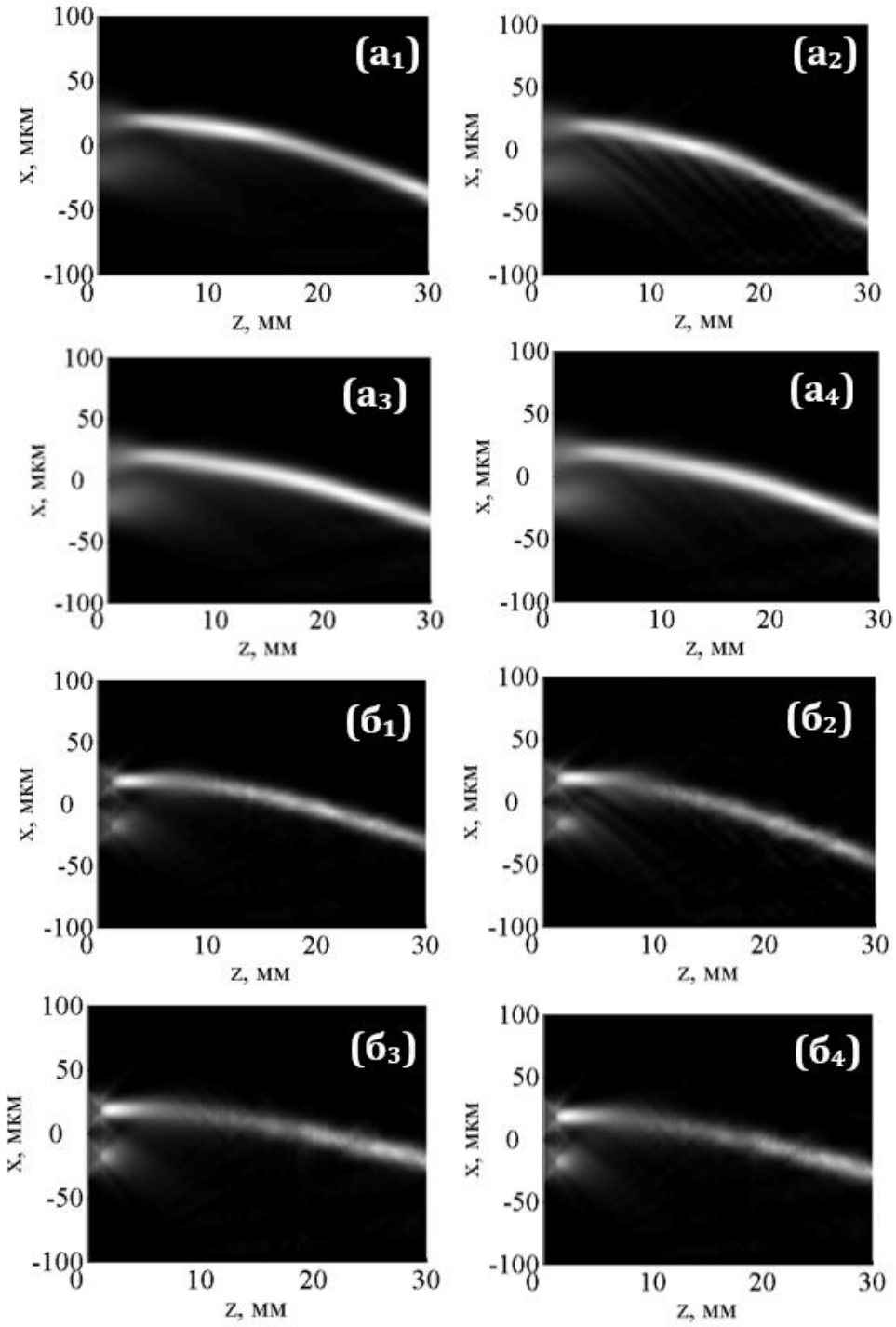
ADDRESSABLE LOCALIZATION OF TWO-DIMENSIONAL LIGHT BEAMS IN BSO AND BTO PHOTOREFRACTIVE CRYSTALS UNDER POLARIZATION AND EXTERNAL ELECTRIC FIELD CONTROL

Abstract. Numerical simulation is used to study the addressable localization of two-dimensional light beams in BSO and BTO photorefractive crystals under polarization and external electric field control. The interaction of orthogonally polarized beams is considered taking into account optical activity.
Keywords: photorefractive crystals, addressable localization of light beams, orthogonally polarized beams, optical activity, external electric field, BSO and BTO crystals, numerical simulation.
For citation: Davydovskaya V. V., Naunyka V. N., Fedorova A. V. Addressable localization of two-dimensional light beams in BSO and BTO photorefractive crystals under polarization and external electric field control // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Управление пространственной структурой световых пучков в нелинейных средах остаётся одной из центральных задач современной фотоники, поскольку открывает путь к созданию перестраиваемых элементов обработки оптических сигналов. В этом контексте фоторефрактивные кристаллы предоставляют уникальную возможность динамической локализации излучения за счёт внешних воздействий. В работе исследуются эффективные механизмы адресной локализации двумерных пучков, реализуемые путём вариации поляризации входного сигнала и приложения внешнего электрического поля.

В работе исследован механизм пространственной локализации двумерных оптиче-

ских пучков в кристаллах силлиенитовой группы – $Bi_{12}SiO_{20}$ и $Bi_{12}TiO_{20}$. Ключевым фактором, обеспечивающим адресную фиксацию поперечного профиля волнового поля, выступает векторное (кросс-поляризационное) взаимодействие двух пучков внутри кубической решетки, инициирующее их взаимный захват.



Взаимодействие двумерных ортогонально поляризованных световых пучков в кристаллах BSO и BTO: $а_1$ – $а_4$ – BSO; $б_1$ – $б_4$ – BTO
Распределение светового поля по толщине кристалла при взаимодействии гауссовых световых пучков:
$а_1$, $б_1$ – без учета оптической активности; $а_2$, $б_2$ – с учетом оптической активности
Распределение светового поля по толщине кристалла при взаимодействии супергауссовых световых пучков:
$а_3$, $б_3$ – без учета оптической активности;
$а_4$, $б_4$ – с учетом оптической активности

В процессе численного моделирования будем использовать следующие значениях параметров:

- кристалла BSO: показатель преломления $n_0 = 2{,}54$; электрооптический коэффициент $r_{41} = 5 \cdot 10^{-12}$ м/В, удельное вращение кристалла $\rho = 22$ град/мм;

- кристалла BTO: $n_0 = 2{,}25$; $r_{41} = 6{,}175 \cdot 10^{-12}$ м/В, $\rho = 6{,}3$ град/мм;

- для обоих кристаллов: $\lambda = 0{,}6328$ мкм; длина кристалла 10 мм, входная плоскость кристалла $(\bar{1}\bar{1}0)$, ориентационный угол $\theta \approx 35{,}3°$, напряжённость внешнего электрического поля $E_0 = 3{,}5$ кВ/см $(\vec{E}_0 \parallel [1\bar{1}\bar{1}])$, радиус пучка $r_0 = 16{,}53$ мкм; расстояние между центрами сечений пучков $\Delta = 18$ мкм.

В работе исследуется взаимодействие световых пучков в оптически активных кристаллах при следующей геометрии входа: верхний пучок (см. рисунок) поляризован вдоль оси *x*, т. е. его электрический вектор сонаправлен с вектором внешнего электростатического поля; нижний пучок, напротив, имеет ортогональную (*y*) поляризацию.

В кристаллах BSO и BTO кросс-поляризационное взаимодействие приводит к отклонению верхнего пучка в сторону нижнего, который, несмотря на сильное рассеяние, выполняет роль управляющего канала. При этом оптическая активность сред индуцирует отток энергии из верхнего пучка – данный эффект заметно выражен в BSO (рис. 1, $а_2$, $б_2$), однако на величину поперечного смещения верхнего пучка он практически не сказывается.

Таким образом, установлено, что оптическая активность кристаллов BSO и BTO не оказывает существенного влияния на степень пространственного смещения излучения, что подтверждает перспективность кубических фоторефрактивных материалов для реализации оптического управления световыми потоками без использования дополнительных электронных компонентов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (договор от 15.06.2026 №1663/2026) в рамках Государственной программы научных исследований № 5 «Фотоника и лазерно-оптические технологии» на 2026–2030 гг. (задание 5.1.13.2).

А. С. Евтушенко[1], М. В. Дашков[1], А. В. Бурдин[1,2,3]
[1]Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
Самара, Российская Федерация
[2]АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[3]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ РАДИОФОТОНИКИ

Аннотация. Рассмотрены микроструктурированные оптические волокна для радиофотоники и методика их проектирования. Она сочетает аналитические оценки, численный модовый анализ в Comsol/Matlab и имитационное моделирование. Учтены эллиптичность и смещения воздушных каналов, что позволяет выбрать устойчивую к деформациям конструкцию оптического волокна.
Ключевые слова*:* микроструктурированные оптические волокна, хроматическая дисперсия, математическое моделирование, метод конечных элементов.
Для цитирования*:* Евтушенко А. С., Дашков М. В., Бурдин А. В. Методика проектирования конструкции микроструктурированных оптических волокон для приложений радиофотоники // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. S. Evtushenko[1], M. V. Dashkov[1], A. V. Bourdine[1,2,3]
[1]Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
Samara, Russian Federation
[2]JSC S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint Petersburg, Russian Federation
[3]The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications
Saint Petersburg, Russian Federation

DESIGN METHODOLOGY FOR MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBERS FOR RADIO-PHOTONICS APPLICATIONS

Abstract. The work considers promising microstructured optical fibers for radio photonics and a methodology for their design. The methodology combines analytical models, modal analysis in Comsol/Matlab, and simulation. The approach takes into account technological distortions, allowing selection of the most suitable fiber design for production and fabrication.
Keywords*:* microstructured optical fibers, chromatic dispersion, mathematical modeling, finite element method.
For citation*:* Evtushenko A. S., Dashkov M. V., Bourdine A. V Design methodology for microstructured optical fibers for radio-photonics applications // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Микроструктурированные оптические волокна являются перспективным компонентом для различных приложений радиофотоники. В частности, для технологии «Радио-по-волокну», связанной с передачей сверхвысокочастотных сигналов, подобные волокна могут использоваться для решения проблемы с хроматической дисперсией. За

счет возможности гибкого управления дисперсионными характеристиками микроструктурированных волокон в широком диапазоне длин волн они могут использоваться как в качестве компенсирующих устройств, так и в качестве основной среды передачи. Реализации микроструктурированных волокон с полой сердцевиной позволяют снизить влияние нелинейных эффектов при передаче сигналов с высоким уровнем мощности, а также находят применение для приложений сенсорики и биотехнологий. При этом используется уникальная возможность разработки конструкций подобных волокон для работы как в оптическом, так и терагерцовом диапазоне. Значительный интерес представляют микроструктурированные волокна для изготовления компактных высокоскоростных оптических модуляторов разного типа (амплитудных, фазовых и поляризационных) и перестраиваемых оптических фильтров, расширяющих возможности формирования и обработки сигналов.

Параметры передачи микроструктурированных оптических волокон определяются комплексной взаимосвязью характеристик материала и конфигурацией микроструктуры. К ключевым геометрическим параметрам, которые необходимо определять в процессе разработки конструкции таких волокон, относятся размеры и форма воздушных каналов, шаг периодической структуры, количество слоёв и тип решётки. Дополнительным фактором, определяющим итоговые передаточные характеристики изготовленного образца волокна, является специфика технологических процессов производства, зачастую приводящая к отклонению итоговой конфигурации от проектной.

Для решения данной прикладной задачи разработана методика проектирования конструкции микроструктурированных оптических волокон, основанная на комбинации упрощенных аналитических моделей, строгих численных методов и имитационного моделирования. На первом этапе на основе приближенных и эмпирических выражений предварительно формулируется конфигурация и определяется приблизительный диапазон вариаций параметров микроструктур. На втором этапе выполняется модовый анализ электромагнитного поля микроструктуры при вариации управляющих параметров. В данной работе на данном этапе используется программное обеспечение Comsol Multiphisics с модулем WaveOptics, реализующее расчёт методом конечных элементов, в совокупности с программным пакетом MathWorks Matlab для автоматизации обработки полученных результатов и управления параметрами моделирования. В результате второго этапа определяются варианты конфигурации микроструктуры, обеспечивающие заданные передаточные характеристики в допустимых пределах. На завершающем этапе отобранные конфигурации проходят тестирование на устойчивость к деформациям и искажениям. При этом на основе накопленного опыта производства микроструктурированных волокон предварительно были определены типовые нарушения конфигурации микроструктуры (эллиптичность воздушных каналов и их смещения), а также степень их проявления. Производится имитационное моделирование при многократных вариациях конфигурации с учетом возможных искажений, и по результатам анализа полученных передаточных характеристик отбирается наиболее пригодная для производства конструкция микроструктурированого оптического волокна.

Исследование выполнено за счет средств федерального бюджета, учредитель Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций.

А. Р. Зангараев, Т. К. Румянцев, Ю. Р. Янгличева
Казанский инновационный университет им. В. Г. Тимирясова, Казань, Российская Федерация

БПЛА-АМФИБИИ: НАВИГАЦИЯ, СВЯЗЬ И СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ В ДВУХ СРЕДАХ

Аннотация. Работа посвящена анализу навигационных, коммуникационных и сенсорных систем БПЛА-амфибий. Представлена ключевая проблема двухсредной навигации – невозможность использования GNSS под водой из-за практически полного поглощения радиоволн L-диапазона в морской воде. Рассмотрены альтернативные подходы: инерциальная навигация на основе МЭМС- и волоконно-оптических IMU, акустическое позиционирование и алгоритмы SLAM. Проанализированы особенности организации связи. Обоснована необходимость комплексной интеграции разнородных сенсоров и повышения уровня автономности бортового управления БПЛА-амфибий.
Ключевые слова: БПЛА-амфибия, гибридный воздушно-водный аппарат, HAAV, двухсредная навигация, GNSS, инерциальная навигация, SLAM, гидроакустическая связь, подводные оптические системы, гидролокация, однолучевой эхолот, многолучевой эхолот, батиметрия, автономное управление.
Для цитирования: Зангараев А. Р., Румянцев Т. К., Янгличева Ю. Р. БПЛА-амфибии: навигация, связь и сенсорные системы в двух средах // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. R. Zangaraev, T. K. Rumynzev, Y. R. Yanglicheva
Kazan Innovative University named after V. G. Timiryasov, Kazan, Russian Federation

AMPHIBIOUS UAVS: NAVIGATION, COMMUNICATION, AND SENSOR SYSTEMS IN TWO ENVIRONMENTS

Abstract. This paper analyzes the navigation, communication, and sensor systems of amphibious UAVs. It addresses a key challenge of dual-medium navigation: the inability to use GNSS underwater due to the near-total absorption of L-band radio waves by seawater. Alternative approaches are examined, including inertial navigation based on MEMS and fiber-optic IMUs, acoustic positioning, and SLAM algorithms. Communication system configurations are analyzed. The paper substantiates the need for the comprehensive integration of heterogeneous sensors and for enhancing the level of onboard control autonomy in amphibious UAVs.
Keywords: amphibious UAV, hybrid air-water vehicle, HAAV, cross-domain navigation, GNSS, inertial navigation, SLAM, hydroacoustic communication, underwater optical systems, sonar, single-beam echo sounder, multibeam echo sounder, bathymetry, autonomous control.
For citation: Zangaraev A. R., Rumynzev T. K., Yanglicheva Y. R. Amphibious UAVs: navigation, communication, and sensor systems in two environments // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Стремительное развитие робототехнических комплексов в XXI веке привело к формированию трёх самостоятельных классов беспилотных платформ, каждый из которых ориентирован на эксплуатацию в определённой физической среде. Беспилотные летательные аппараты (UAV – Unmanned Aerial Vehicle) функционируют в воздушном пространстве, выполняя задачи аэросъёмки, мониторинга, доставки грузов и обеспечения

связи. Безэкипажные подводные аппараты (UUV – Unmanned Underwater Vehicle) предназначены для работы в водной толще: батиметрической съёмки, инспекции подводной инфраструктуры, сбора океанографических данных. Безэкипажные надводные суда (USV – Unmanned Surface Vehicle) действуют на границе раздела водной и воздушной сред, обеспечивая патрулирование акваторий, гидрометеорологические наблюдения и ретрансляцию данных.

Между тем широкий спектр практических задач – экологический мониторинг прибрежных зон, поиск затонувших объектов, инспекция гидротехнических сооружений, разведка минных полей – требует от робототехнической платформы способности последовательно или попеременно действовать как в воздушной, так и в водной среде. Именно на стыке указанных классов возникает понятие БПЛА-амфибии (Amphibious UAV, также обозначаемой в англоязычной литературе как Hybrid Aerial-Aquatic Vehicle, HAAV), представляющей собой беспилотную платформу двойного базирования, способную осуществлять управляемый полёт в атмосфере, совершать контролируемое погружение в водную среду, маневрировать под водой и выполнять обратный переход к воздушному полёту.

Глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS) – GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou – являются стандартным источником координатной информации для любого беспилотного летательного аппарата, обеспечивая определение местоположения с точностью от нескольких метров (стандартный режим) до сантиметров (режим RTK). Электромагнитные волны L-диапазона (1,2–1,6 ГГц), используемые спутниковыми системами, свободно проникают через атмосферу, однако при контакте с водной поверхностью претерпевают практически полное поглощение. Глубина проникновения радиоволн L-диапазона в морскую воду составляет менее 1 см, что делает GNSS-навигацию абсолютно невозможной даже на минимальных глубинах погружения. Данное обстоятельство является фундаментальной проблемой двухсредной навигации БПЛА-амфибий.

При переходе из воздушной среды в водную аппарат мгновенно теряет спутниковый навигационный сигнал, и дальнейшее определение координат должно обеспечиваться альтернативными методами. В существующих разработках применяются три основных подхода: инерциальная навигация, акустическое позиционирование и алгоритмы одновременной локализации и картографирования (SLAM – Simultaneous Localization and Mapping).

Инерциальная навигация основана на измерении ускорений и угловых скоростей с помощью акселерометров, и гироскопов, входящих в состав инерциального измерительного блока (IMU – Inertial Measurement Unit), с последующим численным интегрированием для определения перемещения, скорости и ориентации аппарата. В современных БПЛА-амфибиях используются микроэлектромеханические (МЭМС) IMU тактического класса, характеризующиеся дрейфом гироскопа 1–10 °/ч и нестабильностью нуля акселерометра 0,01–0,1 м/с^2. Основным недостатком инерциальной навигации является накопление ошибки интегрирования: для МЭМС-IMU тактического класса позиционная ошибка растёт со скоростью 0,5–5 м/мин, что допустимо для кратковременных подводных миссий продолжительностью до 10–15 минут, но неприемлемо для длительных операций. Навигационные системы высокого класса на основе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) обеспечивают дрейф 0,01–0,1 °/ч и позиционную ошибку 0,05–0,5 м/мин, однако их стоимость (от 10–20 тыс. долларов) и габариты существенно ограничивают применимость в малогабаритных БПЛА-амфибиях.

Организация связи между БПЛА-амфибией, находящейся в подводном положении, и оператором или координирующей станцией представляет собой одну из наиболее технически сложных задач двухсредной робототехники. В воздушной среде связь обеспечивается стандартными радиоканалами: диапазоны 2,4 ГГц и 5,8 ГГц для управления и передачи видеопотока, диапазон 900 МГц для телеметрии на увеличенных дальностях

(до 10–40 км при использовании направленных антенн). Радиосвязь обеспечивает пропускную способность от единиц кбит/с (телеметрия) до десятков Мбит/с (цифровое видео) с минимальными задержками (единицы миллисекунд).

Для БПЛА-амфибий, действующих в прибрежных зонах на глубинах до 30–50 м и дистанциях до 0,5–2 км, используются гидроакустические модемы умеренной дальности, работающие в частотном диапазоне 20–100 кГц. Типичные параметры таких модемов: скорость передачи данных 1–40 кбит/с, дальность действия 0,5–3 км, потребляемая мощность 5–15 Вт в режиме передачи. Примерами серийных гидроакустических модемов, применимых в БПЛА-амфибиях, являются EvoLogics S2C R (скорость до 31,2 кбит/с, дальность до 3,5 км), LinkQuest UWM2000H (до 17,8 кбит/с, до 1,5 км), Popoto Modem (миниатюрный, до 10 кбит/с, до 2 км). Масса модемов составляет 0,2–1,5 кг, что допускает интеграцию в БПЛА-амфибию среднего размера.

Оптические системы наблюдения являются основным сенсорным инструментом БПЛА-амфибий как в воздушном, так и в подводном режимах работы.

Формирование изображения под водой сопряжено с комплексом оптических явлений, отсутствующих или малозначимых в воздушной среде. Поглощение света водой носит селективный характер: красная составляющая спектра (длина волны $\lambda > 600$ нм) поглощается наиболее интенсивно, с коэффициентом поглощения 0,1–0,5 $м^{-1}$ в чистой морской воде; оранжевый и жёлтый свет поглощается слабее; синий и зелёный диапазоны ($\lambda = 450–550$ нм) проникают на наибольшую глубину с минимальным затуханием (0,02–0,05 $м^{-1}$). Рассеяние света на взвешенных частицах (мутность) вызывает снижение контраста изображения и появление характерной «дымки» (backscatter), особенно при использовании искусственного освещения: свет, отражённый частицами между камерой и объектом, засвечивает изображение. Для компенсации указанных эффектов в подводных камерах БПЛА-амфибий применяются следующие технические решения. Алгоритмическая цветокоррекция (color compensation): программная компенсация селективного поглощения на основе модели затухания света в воде. Простейший подход – адаптивное усиление красного канала с коэффициентом, пропорциональным расстоянию до объекта; более совершенные методы используют физические модели подводного освещения (модель Яффе, модель Макгламери) или нейросетевые подходы (Sea-thru, WaterNet).

Гидроакустические системы являются основным инструментом подводного обнаружения и картографирования, значительно превосходящим оптические системы по дальности действия в типичных условиях прибрежных вод.

Однолучевые эхолоты (SBES – Single-Beam Echo Sounder). Простейший и наиболее лёгкий тип гидроакустического датчика, измеряющий расстояние до дна или объекта в одном направлении по времени прохождения акустического импульса. SBES работают на частотах 30–200 кГц (высокие частоты обеспечивают лучшее разрешение, но меньшую дальность; низкие – наоборот). Для БПЛА-амфибий применяются миниатюрные SBES (например, Blue Robotics Ping Sonar, масса ~ 115 г, дальность до 30 м) для измерения альтитуды (расстояния до дна) и обнаружения крупных препятствий. Однолучевые эхолоты не обеспечивают пространственную картину дна, но являются важным компонентом системы предотвращения столкновений и навигации по высоте.

Многолучевые эхолоты (MBES – Multi-Beam Echo Sounder). Многолучевые эхолоты формируют веерообразный набор лучей (типично 128–1024 лучей), покрывающих сектор 90–160° поперёк направления движения. Каждый луч измеряет глубину в определённом угловом направлении, что позволяет за один проход сформировать полосу батиметрических данных шириной, в 2–7 раз превышающей глубину. При движении аппарата последовательные полосы формируют детальную батиметрическую карту с разрешением до 1–5 см (в зависимости от частоты и дальности).

А. Р. Зангараев, Т. К. Румянцев, Ю. Р. Янгличева
Казанский инновационный университет им. В. Г. Тимирясова
Казань, Российская Федерация

ОДНОФОТОННЫЙ ЛИДАР ДЛЯ МГНОВЕННОГО ТРЕКИНГА МАЛОВЫСОТНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аннотация. Рассмотрена задача мгновенного (низколатентного) обнаружения и сопровождения (трекинга) маловысотных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) малого класса с использованием однофотонной лидарной локации. Показано, что традиционные импульсные лидары и радиолокационные станции сантиметрового диапазона обладают ограниченной чувствительностью при работе по малоразмерным, слабоконтрастным целям на малых высотах вблизи городской застройки и подстилающей поверхности, что приводит к росту вероятности пропуска цели и увеличению времени завязки трассы сопровождения. Предложена архитектура однофотонного лидара на основе лавинных фотодиодов, работающих в гейгеровском режиме (Gm-APD/SPAD), совмещённых со схемой времяпролётного счёта одиночных фотонов (time-correlated single-photon counting, TCSPC) и высокочастотным (мегагерцовым) зондирующим лазерным источником с длиной волны 1550 нм. Разработана аналитическая модель фотонного бюджета лидара для малоразмерной диффузно отражающей цели, учитывающая эффективность оптического тракта, квантовую эффективность детектора и геометрию зондирующего пучка.
Ключевые слова: однофотонный лидар, лавинный фотодиод в режиме Гейгера, времяпролётный счёт фотонов, TCSPC, трекинг БПЛА, маловысотные цели, фотонный бюджет, вероятность обнаружения, латентность сопровождения, фильтр Калмана.
Для цитирования: Зангараев А. Р., Румянцев Т. К., Янгличева Ю. Р. Однофотонный лидар для мгновенного трекинга маловысотных беспилотных летательных аппаратов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. R. Zangaraev, T. K. Rumynzev, Y. R. Yanglicheva
Kazan Innovative University named after V. G. Timiryasov, Kazan, Russian Federation

SINGLE-PHOTON LIDAR FOR INSTANT TRACKING OF LOW-ALTITUDE UNMANNED AERIAL VEHICLES

Abstract. This inquiry addresses the challenges inherent in the instantaneous detection and trajectory tracking of diminutive, low-altitude unmanned aerial vehicles (UAVs) utilizing single-photon LiDAR sensing mechanisms. It is demonstrated that conventional pulsed LiDAR systems and centimeter-wave radars exhibit compromised sensitivity when interrogating small targets featuring low signal-to-background contrast within the cluttered environments of urban canyons and proximate terrain. Such limitations precipitate an elevated probability of detection failure and prolong the requisite latency for trajectory acquisition. Consequently, an architectural framework is proposed for a single-photon LiDAR system founded upon Geiger-mode avalanche photodiodes (Gm-APD/SPAD) integrated with high-frequency time-correlated single-photon counting (TCSPC) circuitry and a megahertz-rate probe laser source operating within the 1550 nm spectral window. Furthermore, an analytical model delineating the photon budget for small, diffusely reflecting targets has been formulated, rigorously accounting for optical path efficiencies, detector quantum efficiency, and the geometric characteristics of the probe beam.

Keywords: single-photon lidar, Geiger-mode avalanche photodiode, time-of-flight photon counting, TCSPC, UAV tracking, low-altitude targets, photon budget, detection probability, tracking latency. Kalman filter.
For citation: Zangaraev A. R., Rumynzev T. K., Yanglicheva Y. R. Single-photon lidar for instant tracking of low-altitude unmanned aerial vehicles // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Рост доступности и функциональных возможностей малых БПЛА мультироторного и самолётного типа массой от десятков граммов до нескольких килограммов породил задачу их своевременного обнаружения и устойчивого сопровождения в интересах безопасности критической инфраструктуры, аэропортов, мест проведения массовых мероприятий и государственной границы. Специфика маловысотного полёта, характерная для таких аппаратов (высоты от единиц до 100-150 м), приводит к тому, что цель наблюдается на фоне интенсивной подстилающей поверхности, зданий и растительности, а её эффективная площадь рассеяния как в радиолокационном, так и в оптическом диапазонах крайне мала и нестационарна вследствие вращения лопастей несущих винтов.

Радиолокационные средства обнаружения БПЛА сантиметрового и миллиметрового диапазонов обеспечивают приемлемую дальность действия, однако подвержены влиянию переотражений от местности (клаттера) и обладают угловой разрешающей способностью, недостаточной для устойчивого трекинга группы малоразмерных целей на малых высотах в условиях застройки. Оптико-электронные и лидарные системы на основе линейных (аналоговых) фотоприёмников ограничены классическим тепловым и дробовым шумом приёмного тракта и требуют значительной энергии зондирующего импульса для формирования измеримого отклика от малоразмерной слабоотражающей цели, что снижает частоту обновления оценки траектории и предъявляет повышенные требования к лазерной безопасности.

Альтернативным направлением, активно развивающимся в последнее десятилетие, является однофотонная лидарная локация, основанная на регистрации единичных фотонов эхосигнала лавинными фотодиодами, работающими в гейгеровском режиме (Gm-APD), либо матрицами однофотонных лавинных диодов (single-photon avalanche diode, SPAD), совместно со схемой времяпролётного счёта одиночных фотонов (time-correlated single-photon counting, TCSPC).

Целью работы является построение аналитической модели однофотонного лидара применительно к задаче обнаружения и сопровождения маловысотных малоразмерных БПЛА, получение количественных оценок латентности формирования достоверной оценки координат цели и разработка архитектуры системы обработки эхосигнала, обеспечивающей минимальную задержку трекинга.

Малый мультироторный БПЛА представляет собой цель с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) в радиодиапазоне порядка 0,001–0,01 м^2, сравнимой с ЭПР крупных птиц, и оптическим поперечником рассеяния, определяемым главным образом фюзеляжем и лопастями несущих винтов, площадь проекции которых составляет единицы-десятки квадратных сантиметров. Полёт на малых высотах ограничивает время нахождения цели в пределах прямой видимости датчика, а близость подстилающей поверхности и застройки формирует интенсивный фон обратного рассеяния (клаттер), маскирующий полезный эхосигнал. Указанные факторы совместно обусловливают низкое отношение сигнал/фон при использовании традиционных средств обнаружения и, как следствие, значительное время накопления, необходимое для завязки и подтверждения трассы сопровождения.

Дополнительным требованием является высокая частота обновления оценки координат цели: угловые ускорения мультироторных БПЛА при маневрировании могут

достигать значений, соизмеримых с временем цикла обзора традиционных сканирующих лидаров (десятки-сотни миллисекунд), что приводит к срыву сопровождения. Таким образом, задача формулируется как обеспечение обнаружения малоразмерной, слабоотражающей, быстро маневрирующей цели на малой высоте при минимальной задержке между актом зондирования и формированием достоверной оценки её координат.

Алгоритм обработки эхосигнала в реальном времени. Обработка данных организована по трёхуровневой схеме. На первом уровне ПЛИС в реальном времени накапливает времяпролётные метки в скользящем окне из M зондирующих импульсов, формируя по каждому пикселю (или группе пикселей) гистограмму задержек. На втором уровне производится обнаружение пика гистограммы на фоне равномерного фонового счёта (солнечная засветка, темновой счёт детектора) по критерию превышения адаптивного порога, вычисляемого с учётом текущей оценки интенсивности фона, и центроидная (взвешенная по амплитуде отсчётов) оценка положения максимума, дающая субимпульсное разрешение по дальности. На третьем уровне полученные на текущем цикле накопления оценки дальности и угловых координат объединяются в измерительный вектор, который подаётся на вход фильтра Калмана, обеспечивающего сглаживание измерений и прогноз положения цели на следующий цикл накопления, что позволяет поддерживать непрерывность трассы сопровождения даже при кратковременном пропуске обнаружения.

Переход к однофотонному режиму регистрации при высокой частоте повторения зондирующих импульсов позволяет реализовать компромисс между чувствительностью, необходимой для работы по малоразмерным слаборассеивающим целям, и быстродействием, требуемым для сопровождения маневрирующих БПЛА. Вместе с тем предложенный подход обладает рядом ограничений, которые необходимо учитывать при практической реализации.

Предложена и обоснована архитектура однофотонного лидара для мгновенного трекинга маловысотных малоразмерных БПЛА, основанная на регистрации единичных фотонов эхосигнала матрицей SPAD совместно со схемой времяпролётного счёта фотонов и высокочастотным (1 МГц) зондирующим лазерным источником. Построена аналитическая модель фотонного бюджета лидара для малоразмерной диффузно отражающей цели и на основе статистики Пуассона получены оценки вероятности обнаружения, латентности формирования оценки координат и точности измерения дальности. Показано, что при дальности до 500 м время формирования достоверной оценки координат цели составляет порядка 1–2 мс при среднеквадратической погрешности измерения дальности на уровне единиц сантиметров, что подтверждает возможность реализации мгновенного трекинга и превышает быстродействие традиционных сканирующих лидарных систем на один-два порядка. Предложена трёхуровневая архитектура обработки эхосигнала, объединяющая аппаратное гистограммирование на ПЛИС, центроидную оценку координат и фильтр Калмана для непрерывного сопровождения траектории цели. Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальную апробацию предложенной модели, а также на разработку алгоритмов сопровождения множественных целей и компенсации эффектов мёртвого времени детектора и спекл-модуляции эхосигнала в реальных атмосферных условиях.

В. А. Зиновьев[1], А. В. Ненашев[1,2], А. А. Шкляев[1,2]
[1]Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
Новосибирск, Российская Федерация
[2]Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

АНТИОТРАЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА ЗА СЧЁТ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ В ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЯХ

Аннотация. Изучено взаимодействие света с покрытиями, состоящими из полупроводниковых нановискеров с высоким показателем преломления. Получено, что вдоль нановискеров возбуждаются резонансы Фабри-Перо, а в поперечном направлении – резонансы Ми. Резонансы переизлучают свет в направлениях под углом и вдоль поверхности подложки. Покрытия из таких наночастиц, сопоставимых по размеру с длиной волны света, эффективны для антиотражения и управления направлением его переизлучения.
Ключевые слова*:* полупроводниковые нановискеры, покрытия из нановискеров, резонансы Фабри-Перо, резонансы Ми, перенаправление света, антиотражающие покрытия.
Для цитирования*:* Зиновьев В. А., Ненашев А. В., Шкляев А. А. Антиотражающие свойства за счёт оптических резонансов в текстурированных покрытиях // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

V. A. Zinoviev[1], A. V. Nenashev[1,2], A. A. Shklyaev[1,2]
[1]Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

ANTI-REFLECTIVE PROPERTIES DUE TO OPTICAL RESONANCES IN TEXTURED COATINGS

Abstract. The paper considers the interaction of light with coatings consisting of semiconductor nanowhiskers with a high refractive index. It was found that Fabry-Perot and Mie resonances are excited along and in transverse directions of the nanowhiskers, respectively. The resonances re-emit light in directions at an angle and along the substrate surface. Coatings of such nanoparticles, comparable in size to the wavelength of light, are effective for anti-reflection and control of the direction of its re-emission.
Keywords*:* semiconductor nanowhiskers, nanowhisker coatings, Fabry-Perot resonances, Mie resonances, light redirection, anti-reflective coatings.
For citation*:* Zinoviev V. A., Nenashev A. V., Shklyaev A. A. Anti-reflective properties due to optical resonance in textured coatings // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Улучшение антиотражающих свойств связано с использованием текстурированных слоёв, содержащих массивы диэлектрических наночастиц с большой величиной показателя преломления. При взаимодействии со светом в таких покрытиях могут проявиться как эффект градиентного показателя преломления, так и эффекты, обусловленные возбуждением в наночастицах оптических резонансов. Резонансы возбуждаемые в отдельных наночастицах, а также в массивах из них уже хорошо изучены для частиц субволнового размера, то есть размера в несколько раз меньшего длины волны возбуждающего света. В таких структурах доминирующими резонансами являются резонансы

Ми, возбуждаемые в отдельных частицах. При захвате света этими резонансами происходит его переизлучение в направлении, определяемом пространственным распределением интенсивности резонансных магнитных и электрических полей. Отметим, что это пространственное распределение находится в сильной зависимости от взаимодействия как с резонансами в соседних частицах, так и в удалённых частицах в случае упорядоченных решёток. Новые результаты показывают, что для широкополосных антиотражающих свойств более эффективны покрытия из частиц размером сравнимым с длиной волны падающего света. В данной работе проведены модельные расчёты пространственных распределений электрических полей при рассеянии света нановискерами теллура длиной 1300 и диаметром 300 нм, а также кластеров из них. Проведено сравнение с экспериментальными данными для покрытий из вискеров такого же размера. На рис. 1 приведены рассчитанные спектры сечения поглощения для одиночного вискера.

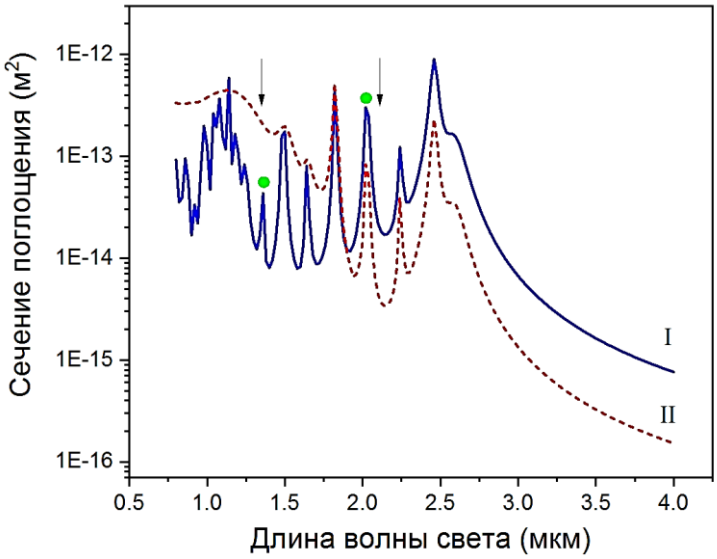


Рис. 1. *Рассчитанные спектры сечения поглощения для одиночного вискера. Спектр I рассчитан для постоянного коэффициента экстинкции 0,01 во всем спектральном диапазоне. Спектр II рассчитан, когда коэффициент экстинкции зависит от длины волны падающего света. Стрелками отмечены спектральные положения минимумов коэффициента отражения, наблюдаемые в эксперименте, а точками указаны длины волн, при которых рассчитывались пространственные распределения электрических полей*

Пространственное распределение резонансных электрических полей показывает, что вдоль вискеров возбуждаются резонансы Фабри-Перо (рис. 2*а-в*), а в поперечном направлении – резонансы Ми (рис. 2*г, д*).

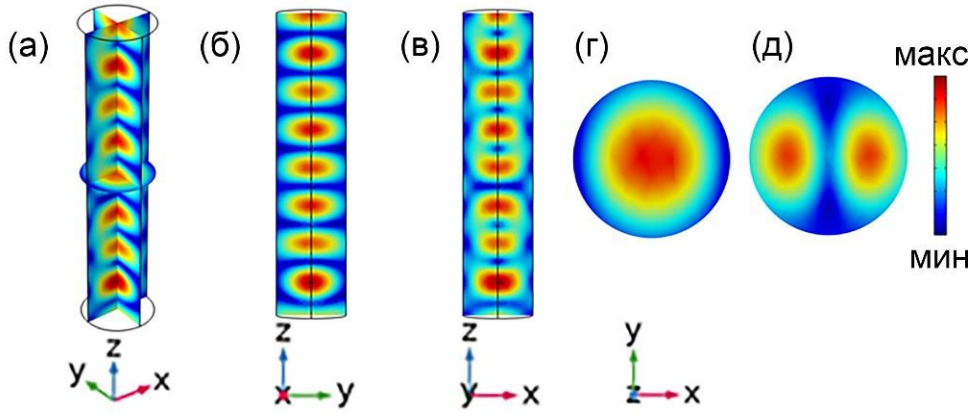


Рис. 2. *Рассчитанное пространственное распределение амплитуды электрического поля для оптического резонанса при 1,36 мкм, отмеченного на рис. 1: (а-в) –сечение в плоскости оси Z, (г, д) – в плоскостях осей XY, проходящих через центр и смещённого на L/18 от центра нановискера, где L – высота нановискера. Световая волна падала на вискер по направлению Z*

Учёт взаимодействия резонансных полей, возбуждаемых на соседних вискерах, путём расчёта кластеров из нескольких вискеров показал, что излучение резонансов у них сильнее направлено вдоль поверхности подложки. Этот эффект является востребованным для практических применений.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНВО РФ в рамках госзадания FWGW-2025-0023 ИФП СО РАН (расчёты) и FSUS-2024-0020 НГУ (эксперимент). Экспериментальные исследования проводились с использованием оборудования АТИЦКП НГУ.

В. Р. Иванова, Н. Е. Колесников
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ СВЕТОДИОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА В СВЕТОВЫХ УСТРОЙСТВАХ НА РАВНОМЕРНОСТЬ ОДНОРОДНОСТИ СВЕТОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния расстояния между светодиодными источниками света в световых устройствах на равномерность однородности светораспределения; для проведения исследования использованы 1 Вт светодиоды. Целью работы было определение оптимального расстояния между СД в световом устройстве, которое исключило бы возникновение чередующихся ярких пятен и затемненных зон между ними на рабочей поверхности. Для эксперимента выбраны расстояния в 3, 5 и 8 см; результат проведения эксперимента показал, что лишь расстояние в 5 см обеспечивает перекрытие пятен без провалов. Таким образом, вопрос нивелирования эффекта точечной яркости от СД требует внимания на стадии проектирования светового устройства.
***Ключевые слова**:* рассеиватель, светодиод, расстояние, световое устройство, КСС.
***Для цитирования**:* Иванова В. Р., Колесников Н. Е. Исследование влияния расстояния между светодиодными источниками света в световых устройствах на равномерность однородности светораспределения // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

V. R. Ivanova, N. E. Kolesnikov
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

A STUDY OF THE EFFECT OF THE DISTANCE BETWEEN LED LIGHT SOURCES IN LIGHTING DEVICES ON THE UNIFORMITY OF LIGHT DISTRIBUTION

Abstract. The paper presents the results of a study on the effect of the distance between LED light sources in lighting devices on the uniformity of light distribution; 1 W LEDs were used for the study. The aim of the work was to determine the optimal distance between LEDs in a lighting device, which would prevent the formation of alternating bright spots and darkened zones between them on the working surface. Distances of 3, 5 and 8 cm were chosen for the experiment; the results of the experiment showed that only a distance of 5 cm ensures overlap of the spots without dips. Thus, the issue of mitigating the effect of spot brightness from an LED requires attention at the design stage of the lighting device.
***Keywords**:* diffuser, LED, distance, lighting device, light intensity curve.
***For citation**:* Ivanova V. R., Kolesnikov N. E. A study of the effect of the distance between LED light sources in lighting devices on the uniformity of light distribution // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В настоящее время применение светодиодных (*LED*) устройств широко распространено – они стали основным типом источников света во многих сферах. Это связано с их энергоэффективностью, долгим сроком службы, гибкостью эксплуатации (управление светом, высокий индекс цветопередачи, малый размеры, экологичность, безопасность и др.). При этом при проектировании световых устройств требуется обеспечить равномерное освещение от него: светодиоды имеют малый размер и при их использова-

нии заметна высокая точечная яркость, последнее приводит к ряду недостатков. К таковым относятся возникновение дискомфорта для глаз; неравномерная освещенность рабочей поверхности, где наблюдаются чередующиеся яркие пятна и затемненные зоны между ними; локальный нагрев в световом устройстве в зоне кристалла СД, что ведет к росту температуры *p-n*-перехода; цветовая неоднородность в случае использования в устройстве СД разных бинов. Таким образом, вопрос нивелирования негативных эффектов от наличия точечной яркости светодиодов в устройстве требует комплексного подхода на стадии проектирования.

В работе сделан акцент на исследовании влияния расстояния между светодиодными источниками света в световых устройствах на равномерность однородности светораспределения. Для проведения исследования были выбраны светодиоды, используемые в светильниках типа «Армстронг» (*SMD*2835: мощность 1 Вт, угол рассеивания света – 120°).

Эксперимент был проведен в два этапа: первый был связан с определением распределения света в зависимости от расстояния между СД и построения кривой силы света (КСС); второй – с определением изменения итоговой равномерности в зависимости от типа рассеивателя светового устройства.

Для чистоты эксперимента и исключения постороннего света (естественного от окон или искусственного от внутреннего освещения) опыты проведены в затемненной комнате. На первом этапе была выполнена сборка схема со светодиодными модулями на базе блока питания 24 В, для ограничения тока установлен резистор, последовательно к нему были подключены два СД. Каждый СД смонтирован на алюминиевом радиаторе для отвода тепла и в целях наличия несущей основы. Измерение кривой силы света (КСС) выполнялось с обеспечением корректного позиционирования - источник света и измерительный датчик располагались на единой оптической оси; перемещение датчика осуществлялось с помощью транспортира. Перед началом измерений СД работает в установленном режиме в течение 5 минут для достижения теплового равновесия, последнее требуется в целях устранения систематической погрешности, которая может возникнуть из-за влияния на форму КСС температуры *p-n*-перехода. Измерения проводились в горизонтальной плоскости с шагом 10°, на расстоянии 30 см. Далее фотоприемник фиксировал силу света для каждого углового положения. С целью обеспечения статистической достоверности данных каждое измерение повторялось 5 раз. Таким образом, проведена серия измерений: сначала для одного светодиода, далее – для двух светодиодов при варьировании расстояния между ними, на завершающем этапе – для светодиода с разными рассеивателями.

В целях сравнения в начале проведено измерение для одного СД. После выполнения измерений без рассеивателя проведена серия замеров с рассеивателями, устанавливаемыми на расстоянии 5 см от СД. Использованы пять типов рассеивателей: №1 - матовый плотный (коэффициент пропускания 85 %), №2 – матовый светлый (65 %), №3 - прозрачный, №4 - призматический, №5 – «колотый лёд». Результаты также представлены на графике (рис. 1).

Далее выполнены измерения с двумя светодиодами: сначала их установили на расстоянии 3 см друг от друга, выполнили серию измерений, затем расстояние последовательно увеличивали (5 см, 8 см) и для каждого варианта фиксировали показания (рис. 2). Параллельно оценивали параметры системы при использовании различных рассеивателей, чтобы учесть их влияние на распределение светового потока (для расстояния между СД 5 см) (рис. 2).

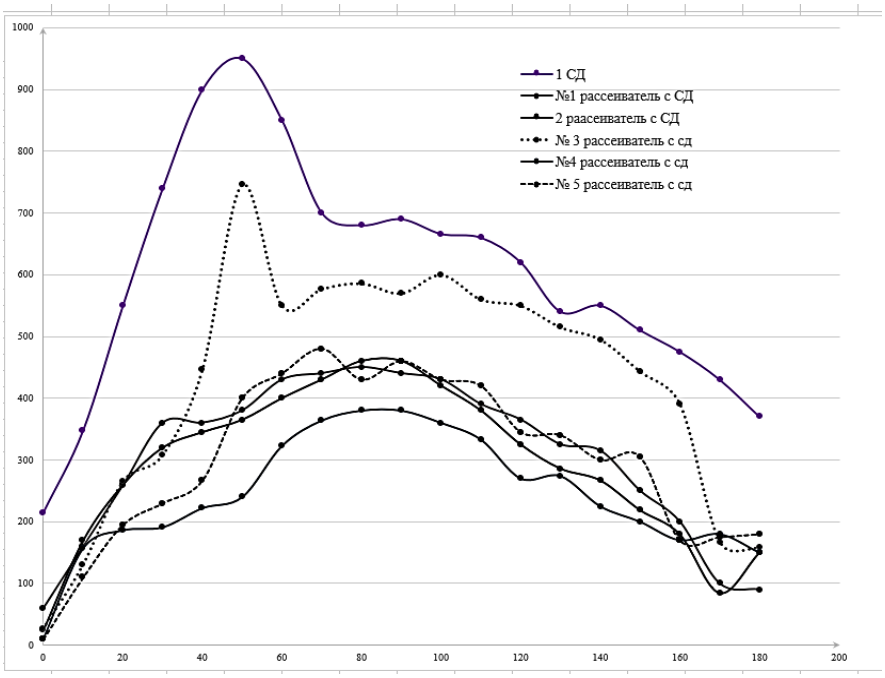


Рис. 1. *Результаты серии измерений для 1 СД*

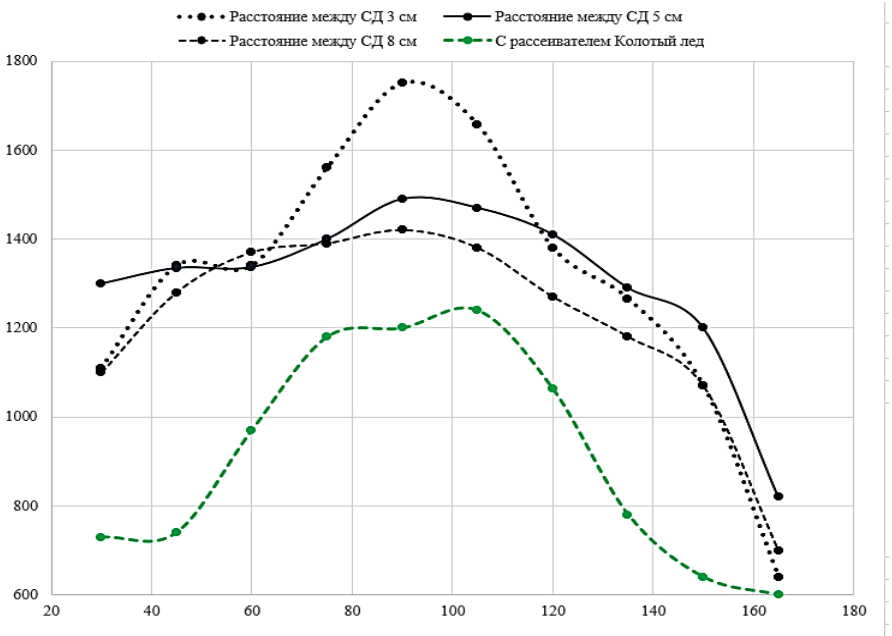


Рис. 2*. Измерение с двумя СД без рассеивателя и с рассеивателем «Колотый лед» для расстояния 5 см*

Расстояние между СД играет важную роль для равномерности освещения: при слишком малом интервале пятна света сливаются, при слишком большом – возникают тёмные зоны. В результате выполнения исследования оптимальным для СД типа *SMD*2835 оказалось расстояние в 5 см – оно обеспечивает перекрытие пятен без провалов. Использование рассеивателей повышают уровень равномерности, причём наилучший результат показали варианты «колотый лёд» (№5) и матовый (№2). При этом рассеиватель с лучшими показателями не компенсирует расположение СД в устройстве – на расстоянии 8 см тёмная зона сохраняется.

В. И. Казаков[1], О. В. Шакин[1,2], С. В. Акимов[3]
[1]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Российская Федерация
[3]ООО «ВПГ Лазеруан», Фрязино, Московская область, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ БЕССЕЛЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ В КРИСТАЛЛЕ $NABI(MoO_4)_2$

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования акустооптической модуляции бесселевых пучков нулевого порядка в кристалле $NaBi(MoO_4)_2$. Показано, что уширение дифрагированного импульса для бесселева пучка составляет 50–60 нс, в то время как для гауссова пучка оно составляет порядка 300 нс. Эффективность дифракции бесселева пучка превышает 60% при мощности управляющего сигнала 1,5–2,5 Вт.
Ключевые слова: акустооптика, бесселев пучок, квазибездифракционный пучок, акустооптическая модуляция, молибдат натрия-висмута, эффективность дифракции, временные характеристики.
Для цитирования: Казаков В. И., Шакин О. В., Акимов С. В. Особенности акустооптической модуляции бесселевых световых пучков в кристалле $NaBi(MoO_4)_2$ // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

V. I. Kazakov, O. V. Shakin, S. V. Akimov
[1]Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Saint Petersburg, Russian Federation
[2]Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russian Federation
[3]VPG LaserOne LLC, Fryazino, Moscow Region, Russian Federation

FEATURES OF ACOUSTO-OPTIC MODULATION OF BESSEL LIGHT BEAMS IN A $NaBi(MoO_4)_2$ CRYSTAL

Abstract. The report presents the results of an experimental study of acousto-optic modulation of zero-order Bessel beams in a $NaBi(MoO_4)_2$ crystal. The diffracted-pulse broadening is 50–60 ns for the Bessel beam and about 300 ns for the Gaussian beam. The diffraction efficiency exceeds 60% at a control-signal power of 1,5–2,5 W.
Keywords*:* acousto-optics, Bessel beam, quasi-nondiffracting beam, acousto-optic modulation, sodium bismuth molybdate, diffraction efficiency, temporal characteristics.
For citation*:* Kazakov V. I., Shakin O. V., Akimov S. V. Features of acousto-optic modulation of Bessel light beams in a $NaBi(MoO_4)_2$ crystal // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6–8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Квазибездифракционные световые пучки представляют интерес для задач оптической обработки информации, лазерной техники, дистанционного зондирования и передачи энергии. Бесселевы пучки способны сохранять характерную пространственную структуру на значительных расстояниях и имеют свойство самовосстановления после частичного экранирования. В отличие от гауссова пучка, их энергия распределена между центральным максимумом и системой концентрических колец, а отдельные компоненты распространяются под различными углами к оптической оси. Поэтому характеристики акустооптической модуляции зависят не только от параметров кристалла и

акустической волны, но и от геометрии перекрытия пучка с областью взаимодействия.

Целью работы являлось экспериментальное исследование временных характеристик и эффективности акустооптической модуляции бесселевых пучков нулевого порядка в сравнении с гауссовыми. В качестве акустооптического материала использован кристалл молибдата натрия-висмута $NaBi(MoO_4)_2$. Экспериментальный образец модулятора имел рабочую апертуру 2 мм и рабочую частоту 200 МГц, мощность управляющего сигнала изменялась от 0 до 3 Вт. Исследования выполнялись в видимом диапазоне на длине волны 632 нм.

Бесселев пучок формировался с помощью расширителя и аксикона. При сравнительных измерениях аксикон заменялся длиннофокусной линзой, а остальные элементы экспериментальной схемы и условия регистрации сохранялись. Дифрагированное излучение регистрировалось фотоприемником, временные параметры определялись по осциллограммам. Формировались акустические импульсы длительностью от 0,2 до 5 мкс; измерялись длительность дифрагированного оптического импульса и эффективность перераспределения энергии в дифрагированный порядок.

Наиболее выраженное различие получено для временных характеристик. Для гауссова пучка наблюдалось систематическое увеличение длительности дифрагированного импульса примерно на 300 нс, определяемое временем пересечения акустическим импульсом поперечного сечения оптического пучка. Для бесселева пучка уширение составляло порядка 50–60 нс во всем исследованном диапазоне длительностей управляющего импульса (рис. 1). По времени пересечения акустической волной центральной области пучка его эффективный диаметр в зоне взаимодействия был оценен приблизительно в 0,1 мм.

Сопоставление эффективности дифракции показало, что для гауссова пучка при оптимальной настройке она могла приближаться к 100 %. Для бесселева пучка максимальные значения были ниже, однако при мощности управляющего сигнала от 1,5 до 2,5 Вт эффективность устойчиво превышала 60 % (рис. 2). Таким образом, достаточно эффективная модуляция квазибездифракционного излучения возможна даже в акустооптическом устройстве, первоначально рассчитанном на работу с гауссовыми пучками.

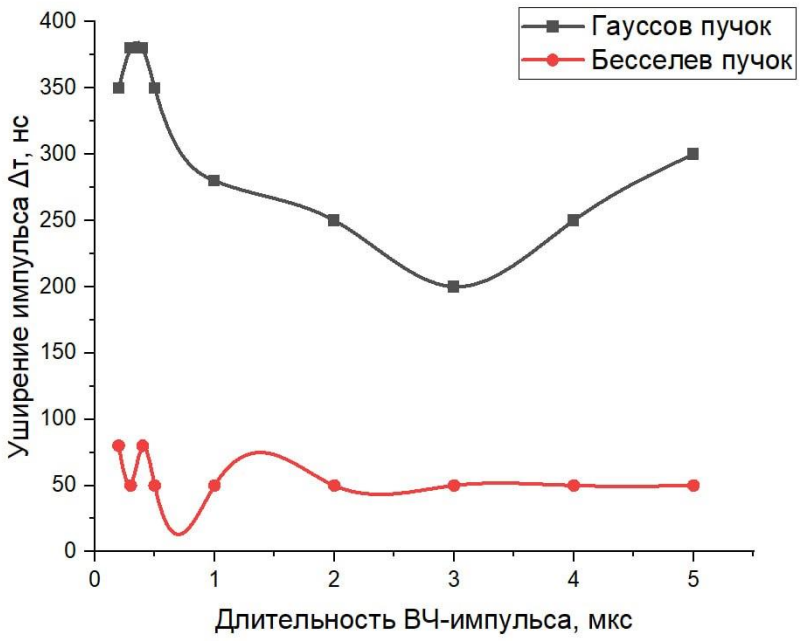


Рис. 1. *Зависимость уширения дифрагированного импульса от длительности ВЧ-импульса*

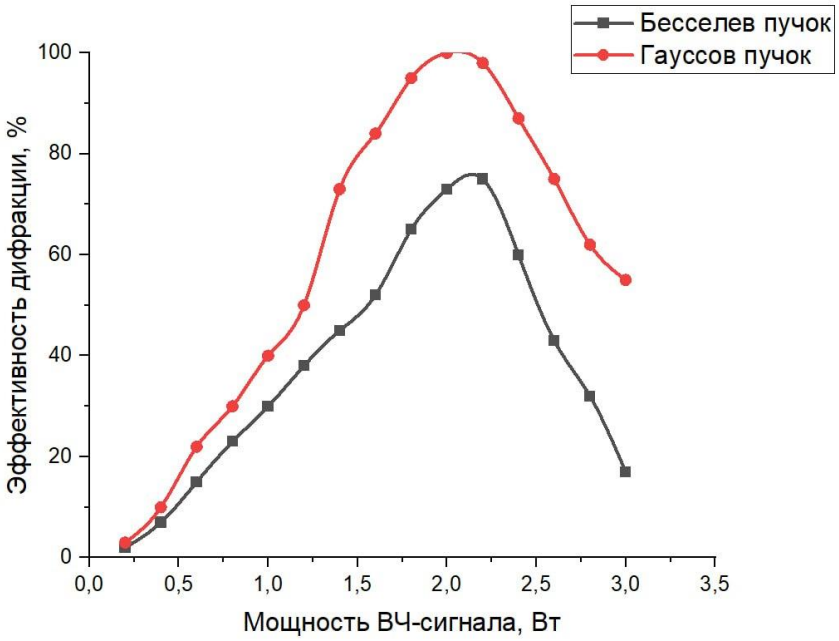


Рис 2. *Сопоставление эффективности дифракции для бесселева и гауссова пучка*

Снижение эффективности для бесселева пучка связано с его конусной структурой и особенностями перекрытия квазибездифракционного участка с областью распространения акустической волны. Эксперимент показал заметную чувствительность результата к взаимной юстировке пучка и модулятора. При оптимальном перекрытии значительная часть энергии участвует во взаимодействии, тогда как смещение этой области приводит к снижению эффективности. Следовательно, при проектировании специализированных акустооптических устройств необходимо учитывать пространственную структуру поля и согласовывать геометрию оптического и акустического каналов.

Полученные результаты показывают, что применение бесселевых пучков позволяет существенно уменьшить искажения временной формы дифрагированного импульса по сравнению с гауссовыми пучками при сохранении высокой эффективности взаимодействия. Это создает предпосылки для использования квазибездифракционных пучков в акустооптических модуляторах и дефлекторах для систем оптической связи, лазерной локации и передачи энергии.

Работа выполнена в рамках проекта, реализуемого совместно образовательными и научными организациями Санкт-Петербурга и Республики Беларусь, грант № 25-РБ-09-14.

М. Э. Костюлин, А. А. Спектор, А. А. Мурасев
Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Российская Федерация

ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЯ И ПРЕВЫШЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ НИВЕЛИРНЫХ СИСТЕМАХ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ДЛЯ КОДИРОВАНИЯ НИВЕЛИРНОЙ РЕЙКИ

Аннотация. Исследуются методы измерения расстояния и превышения в электронных нивелирных системах с кодированной рейкой. Для определения расстояния предложен алгоритм на основе анализа вертикального размера штрихов рейки. Измерения превышения осуществляются посредством М-последовательности и корреляционной обработки сигнала. Математическое моделирование с учетом физических процессов подтвердило устойчивость метода и перспективность применения М-последовательностей в электронных нивелирах.
Ключевые слова: М-последовательность, цифровая обработка изображений, корреляционный анализ, электронный нивелир, кодовая рейка.
Для цитирования: Костюлин М. Э., Спектор А. А., Мурасев А. А. Измерение расстояния и превышения в электронных нивелирных системах, использующих М-последовательность для кодирования нивелирной рейки // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

M. E. Kostyulin, A. A. Spector, A. A. Murasev
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

DISTANCE AND HEIGHT DIFFERENCE MEASURMENT IN ELECTRONIC LEVELING SYSTEMS WITH A CODED STAFF

Abstract. This paper investigates methods for measuring distance and height difference in electronic leveling systems using a coded staff. The distance is proposed to be determined by an algorithm based on the analysis of the vertical dimensions of the staff markings. Height difference is measured using an M-sequence and correlation-based signal processing. Mathematical modeling that accounts for relevant physical processes confirmed the robustness of the proposed approach and the potential of M-sequences for use in electronic leveling instruments.
Keywords: M-sequence, digital image processing, correlation analysis, electronic level, coded staff.
For citation: Kostyulin M. E., Spector A. A., Murasev A. A. Distance and height difference measurement in electronic leveling systems with a coded staff // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В последние десятилетия требования к точности, метрологической стабильности и эксплуатационной надежности оптико-электронных измерительных систем существенно повысились. В современной геодезии и нивелировании наблюдается переход от традиционных методов визуального считывания отсчетов по нивелирной рейке к цифровым технологиям, основанным на применении кодово-штриховых реек и автоматизированном определении положения визирной оси. Нивелир представляет собой геодезический измерительный прибор, предназначенный для определения расстояния R и

превышения $h_п$. Современная электронная нивелирная система включает кодированную нивелирную рейку и оптико-электронный измерительный модуль, осуществляющий регистрацию и цифровую обработку изображения рейки с последующим вычислением искомых параметров. Использование электронных нивелиров позволяет повысить производительность и точность измерений, а также минимизировать влияние субъективного фактора оператора. Вместе с тем эффективность функционирования таких устройств определяется устойчивостью измерительного тракта к воздействию внешних и внутренних факторов, включая шумы, освещенность, расфокусировку оптической системы и другие виды искажений регистрируемого сигнала. В связи с этим разработка методов и алгоритмов цифровой обработки, обеспечивающих устойчивое определение измерительных параметров при наличии указанных воздействий, является актуальной задачей.

На рис. 1 представлена модель измерения превышения. Система задаётся положением нивелира и рейки. Высота визирной оси обозначается $h_н$, высота отсчёта на рейке – $h_р$, горизонтальная дальность – R, угол обзора – α. Превышение определяется разностью высот $h_п = h_н - h_р$.

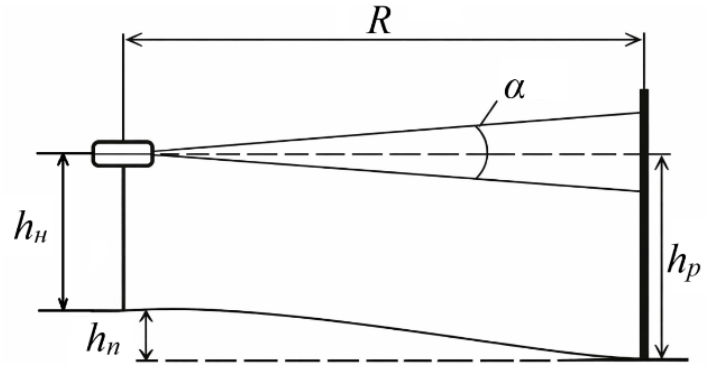


***Рис. 1**. Модель измерения превышения*

Целью данной работы является исследование применения М-последовательностей для кодирования нивелирной рейки и оценка устойчивости измерения расстояния и превышения при аномальных воздействиях, включая шумы фотоприемного устройства и битовые искажения сигнала.

В электронных нивелирных системах расстояние до кодированной рейки определяет масштаб её изображения на фотоприемной матрице, а также протяжённость фрагмента кодовой последовательности, попадающего в поле зрения измерительной системы. Одним из методов определения дальности является анализ геометрических параметров зарегистрированных штрихов, в частности их вертикального размера в пикселях.

При увеличении расстояния до рейки её изображение на фотоприемной матрице уменьшается вследствие изменения углового размера наблюдаемого объекта. В результате вертикальный размер штрихов на зарегистрированном изображении закономерно изменяется с дальностью. Данная зависимость определяется геометрическими и оптическими параметрами измерительной системы и может быть представлена в виде:

$$R = \frac{I_в I_г}{\tau_в 2 sin(\frac{\alpha}{2})}, \quad (1)$$

где $\tau_в$ – усредненное значение высоты одного штриха в пикселях, $I_в$ – вертикальный размер фотоприемной матрицы, $I_г$ – горизонтальный размер фотоприемной матрицы, α – угол зрения объектива нивелира.

Исследование алгоритма выполнено с помощью математического моделирования,

учитывающего работу оптической системы, влияние шумов и дискретность ФПМ. На рис. 2 представлены результаты эксперимента по измерению расстояния, в котором расстояние до рейки изменялось в диапазоне от 2 м до 100 м с шагом в 1 м. Для каждой точки вычислялись математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение ошибки измерений, что позволило оценить точность и устойчивость предложенного метода.

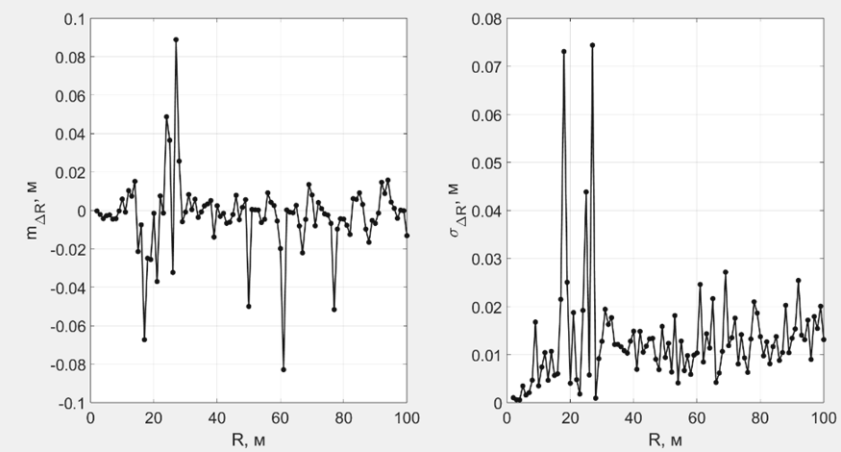


Рис. 2. *Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение ошибки измерения расстояния*

На рис. 2 абсолютное значение смещения не превышает 0,09 м, при этом максимальное относительное смещение составляет около 0,4% от измеряемого значения. Среднеквадратическое отклонение в основном находится в пределах 0,01–0,02 м, а максимальное значение составляет 0,075 м, что соответствует примерно 0,3% от измеряемого расстояния в точке максимума. При увеличении расстояния наблюдается общая тенденция к снижению относительной погрешности, несмотря на наличие отдельных выбросов.

Измерение превышения основано на корреляционной обработке М-последовательности, нанесённой на нивелирную рейку. В поле зрения прибора попадает лишь фрагмент кодовой последовательности, который после регистрации фотоприемной матрицей и предварительной цифровой обработки представляется в виде цифрового сигнала. Для определения положения этого фрагмента вычисляется взаимная корреляционная функция между наблюдаемым сигналом и заранее сформированной опорной последовательностью. Положение максимума взаимной корреляционной функции соответствует участку рейки, попавшему в поле зрения прибора, что позволяет определить превышение. На рис. 3 приведены зависимости математического ожидания и среднеквадратическое отклонение ошибки измерения превышения от расстояния.

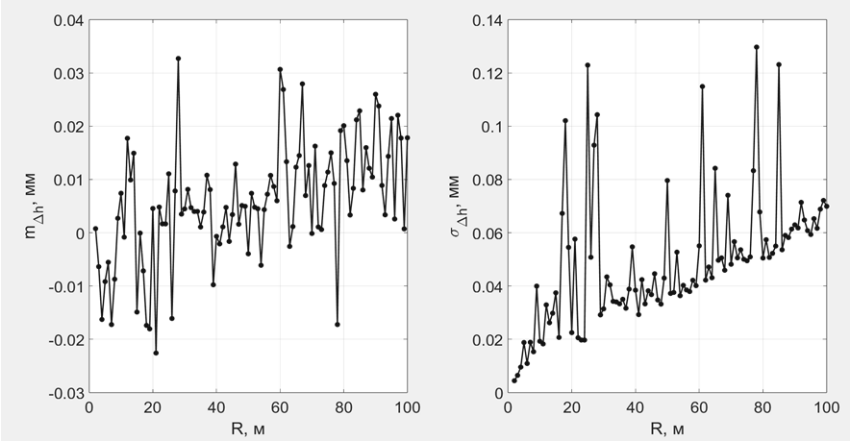


Рис. 3. *Математическое ожидание и СКО ошибки измерения превышения*

На рис. 3 среднее смещение не превышает 0,033 мм, тогда как среднеквадратическое отклонение составляет не более 0,06 мм, достигая максимального значения около 0,13 мм. Таким образом, абсолютная ошибка измерения превышения находится на уровне сотых долей миллиметра, а максимальное среднеквадратическое отклонение – порядка десятых долей миллиметра.

Полученные результаты по определению расстояния можно сопоставить с характеристиками серийных цифровых нивелиров. Например, для Sokkia SDL30 заявлена точность измерения расстояния ±10 мм при расстояниях до 10 м, ±0,1 % от расстояния в диапазоне 10–50 м и ±0,2 % при расстояниях 50–100 м. Для цифровых нивелиров Leica Geosystems LS10/LS15 заявлено СКО измерения расстояния 500 ppm (0,05 %) для расстояний до 50 м и 1000 ppm (0,1 %) для максимальной дальности. Таким образом, результаты моделирования находятся на уровне точности, сопоставимым с высокоточными цифровыми нивелирами.

Сочетание метода определения расстояния по вертикальному размеру штрихов с корреляционным определением превышения на основе М-последовательностей позволяет сформировать единую измерительную схему электронного нивелирования, характеризующуюся повышенной устойчивостью к воздействию помех. Применение М-последовательностей обеспечивает высокую различимость кодовых фрагментов и селективность корреляционного отклика, в том числе при обработке относительно коротких участков последовательности.

Предлагаемый подход создает предпосылки для расширения рабочего диапазона электронных нивелиров и повышения надежности определения измерительных параметров при наличии внешних возмущающих факторов, включая ограниченную освещенность, шумы и оптические искажения регистрируемого изображения.

А. О. Никифорова[1], Н. А. Давлеткильдеев[2,3], С. В. Кривальцевич[1,2]
[1]Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация
[2]Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация
[3]Омский научный центр СО РАН, Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА ВЧ-УВЧ ДИАПАЗОНОВ В РАДИОФОТОННОЙ СИСТЕМЕ С ПРЯМОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ГЛУБИНЕ МОДУЛЯЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Аннотация. Исследовано влияние глубины модуляции лазерного излучения на уровни интермодуляционных составляющих второго и третьего порядка в аналоговой радиофотонной системе с прямой модуляцией. Показано, что увеличение глубины модуляции приводит к росту относительной мощности интермодуляционных составляющих и смещению их минимальных значений в область более высоких частот. На основе экспериментальных данных определены значения динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих.
Ключевые слова*:* радиофотонная система, прямая модуляция лазерного излучения, аналоговые сигналы ВЧ-УВЧ диапазона, интермодуляционные искажения, динамический диапазон.
Для цитирования*:* Никифорова А. О., Давлеткильдеев Н. А., Кривальцевич С. В. Исследование интермодуляционных искажений сигнала ВЧ-УВЧ диапазонов в радиофотонной системе с прямой модуляцией при различной глубине модуляции лазерного излучения // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. O. Nikiforova[1], N. A. Davletkildeev[2,3], S. V. Krivaltsevich[1,2]
[1]Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation
[2]Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation
[3]Omsk Scientific Center SB RAS, Omsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF INTERMODULATION DISTORTIONS OF HF-UHF SIGNALS IN A RADIOPHOTONIC SYSTEM WITH DIRECT MODULATION AT DIFFERENT MODULATION DEPTHS OF LASER RADIATION

Abstract. The paper investigates the influence of the modulation depth of laser radiation on the levels of second- and third-order intermodulation components in an analog radiophotonic system with direct modulation. It is shown that an increase in the modulation depth leads to an increase in the relative power of the intermodulation components and a shift of their minimum values toward higher frequencies. The experimental data served as the basis for determining the values of the spurious-free dynamic range.
Keywords*:* radiophotonic system, direct modulation of laser radiation, analog HF-UHF signals, intermodulation distortions, dynamic range.
For citation*:* Nikiforova A. O., Davletkildeev N. A., Krivaltsevich S. V. Investigation of intermodulation distortions of HF-UHF signals in a radiophotonic system with direct modulation at different modulation depths of laser radiation // Radiophysics, Photonics and the Study of the

Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Одной из ключевых задач при проектировании аналоговых радиофотонных систем является передача сигнала на большие расстояния с минимальными искажениями. При использовании прямой модуляции интенсивности оптического излучения одним из основных источников нелинейных искажений является лазерный диод. От глубины модуляции лазерного излучения зависят такие параметры как отношение сигнал/шум, уровень нелинейных искажений, которые определяют протяженность линии передачи и пропускную способность системы. Увеличение глубины модуляции приводит к увеличению мощности полезного сигнала, но одновременно с этим растут и интермодуляционные искажения. Наибольшую помеху полезным сигналам создают интермодуляционные составляющие третьего порядка. Для количественной оценки искажений в аналоговых радиофотонных системах при подаче двухтонального сигнала применяется динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих.

Целью работы является исследование влияния глубины модуляции лазерного излучения на уровни интермодуляционных искажений второго и третьего порядков в радиофотонной системе с прямой модуляцией, а также оценка динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих, на основе полученных экспериментальных данных.

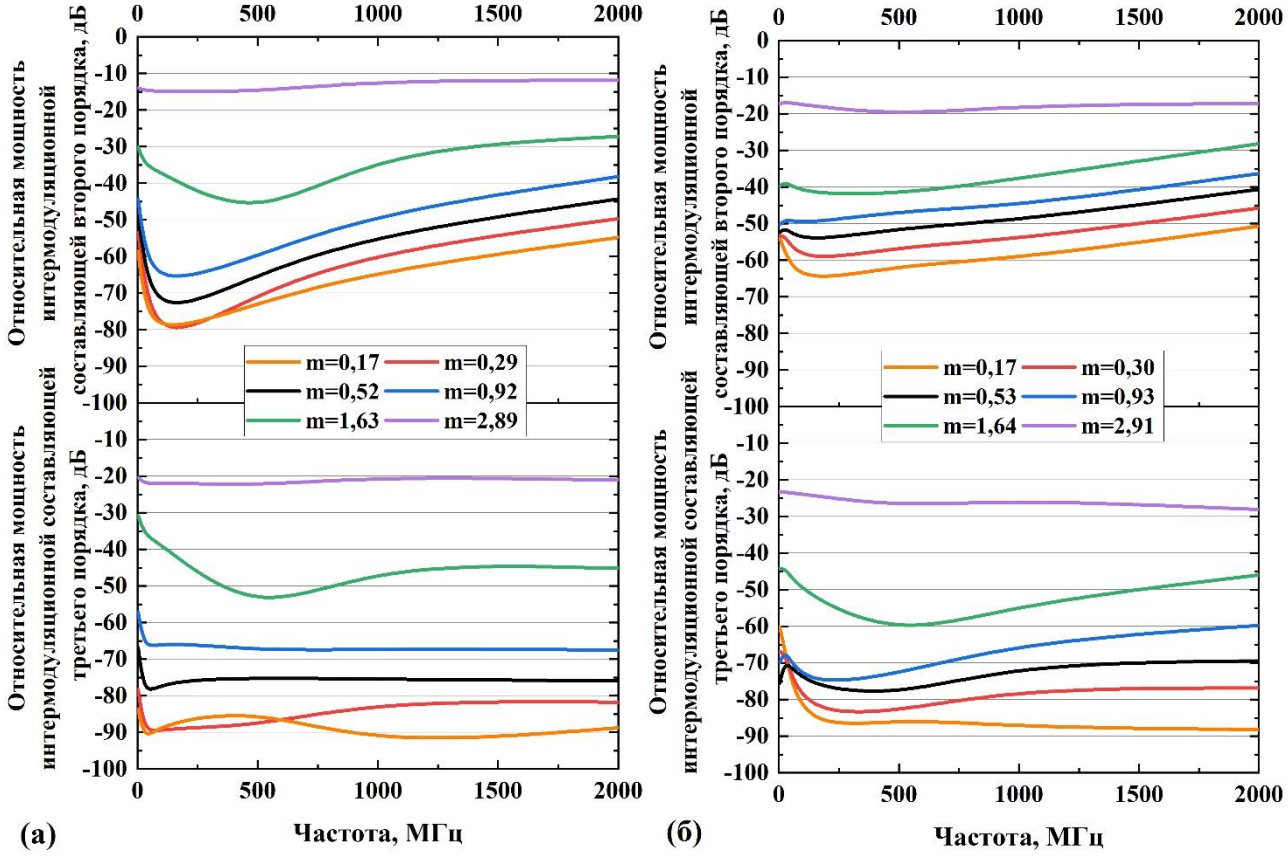
В работе исследовалась радиофотонная система, состоящая из передающего оптического модуля с прямой модуляцией на основе лазерного диода с резонатором Фабри-Перо с длиной волны излучения 1310 нм и лазерного диода с распределенной обратной связью с длиной волны излучения 1550 нм, оптического изолятора и приемного оптического модуля на основе InGaAs PIN-фотодиода. Оптическое волокно между передающим и приемным модулями не использовалось для исключения влияния хроматической дисперсии на результаты измерений.

Рабочая точка каждого лазерного диода устанавливалась с помощью драйвера в середине линейного участка ватт-амперной характеристики. Измерения осуществлялись при подаче на вход передающего оптического модуля с помощью сумматора двух сигналов, отличающихся по частоте на 0,1 МГц. Изменение мощности сигнала генераторов обеспечивало изменение глубины модуляции оптического излучения. Глубина модуляции в данном случае определялась суммарным вкладом двух модулирующих сигналов. В спектре выходного сигнала определялись уровни интермодуляционных составляющих второго и третьего порядков относительно основной составляющей сигнала. На основании экспериментальных данных рассчитывались значения динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих.

На рисунке представлены частотные зависимости относительной мощности интермодуляционных составляющих второго и третьего порядка при различных глубинах модуляции для передающих оптических модулей на основе лазерных диодов с распределенной обратной связью и резонатором Фабри-Перо. Для лазерного диода с распределенной обратной связью при токе накачки 59 мА и выходной оптической мощности 8,6 мВт увеличение глубины модуляции от 0,17 до 2,89 сопровождается существенным возрастанием уровня интермодуляционных составляющих (рис. *а*). Положение минимума относительной мощности интермодуляционных составляющих изменяется с увеличением глубины модуляции. Для составляющих второго и третьего порядка минимум при малых глубинах модуляции располагается в области 30–100 МГц и с увеличением глубины модуляции смещается в область 500 МГц. Динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих, для данного модуля изменяется в диапазоне от 102,6 до 108,4 дБ, достигая максимального значения при частоте входного сигнала 100 МГц.

Для передающего оптического модуля на основе лазерного диода с резонатором

Фабри-Перо при токе накачки 44,5 мА и выходной оптической мощности 4,6 мВт с увеличением глубины модуляции от 0,17 до 2,91 относительная мощность интермодуляционных составляющих второго и третьего порядка также возрастает (рис. *б*). При малых глубинах модуляции минимумы интермодуляционных составляющих преимущественно располагаются в области 100 МГц, а при больших глубинах модуляции смещаются в область 500 МГц. Динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих, при частотах от 3 до 100 МГц изменяется от 104,4 до 106,0 дБ, а при увеличении частоты до 2 ГГц снижается до 95,9 дБ.



Частотные зависимости относительной мощности интермодуляционных составляющих второго и третьего порядка при различных глубинах модуляции: (а) - лазерный диод с распределенной обратной связью; (б) - лазерный диод с резонатором Фабри-Перо

Таким образом, увеличение глубины модуляции для обоих типов лазерных диодов приводит к росту относительной мощности интермодуляционных составляющих второго и третьего порядка и смещению их минимумов в область более высоких частот. Максимальное значение динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих, составило108,4 дБ для лазерного диода с распределенной обратной связью и 106,0 дБ для лазерного диода с резонатором Фабри-Перо.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

А. С. Параскун, В. И. Казаков, Я. А. Рывкина
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург, Российская Федерация

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДИАГНОСТИКИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ РАННЕГО ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ВОЗГОРАНИЯ

Аннотация. Представлен двухканальный прибор диагностики воздушной среды, объединяющий лазерно-оптический и матричный спектроскопический каналы для раннего выявления теплового конвекционного потока, аэрозольных включений и спектральных признаков пламени. Показана эффективность комплексной обработки сигналов, обеспечивающей высокую селективность и сокращение времени отклика системы.
Ключевые слова: тепловой конвекционный поток, спектрально-временной анализ, спектроскопическая диагностика, оптические методы контроля, вейвлет-анализ.
Для цитирования: Параскун А. С., Казаков В. И., Рывкина Я. А. Двухканальный оптический прибор диагностики воздушной среды для раннего выявления признаков возгорания // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. S. Paraskun, V. I. Kazakov, Y. A. Ryvkina
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Saint Petersburg, Russian Federation

DUAL-CHANNEL OPTICAL DEVICE FOR AIR MONITORING TO DETECT EARLY STAGE OF FIRE

Abstract. The paper presents a dual-channel diagnostic device combining laser-optical and matrix spectroscopic modules. The system enables early detection of thermal convection, aerosol inclusions and flame-related spectral features. The integrated signal-processing approach improves selectivity and reduces response time.
Keywords*:* thermal convection flow, spectral-temporal analysis, spectroscopic diagnostics, optical monitoring methods, wavelet analysis.
For citation*:* Paraskun A. S., Kazakov V. I., Ryvkina Y. A. Dual-channel optical device for air monitoring to detect early stage of fire // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Ранняя диагностика термодинамической активности в закрытых помещениях является ключевым условием повышения эффективности систем пожарной безопасности. Промышленные извещатели реагируют преимущественно на поздние стадии развития очага, когда в среде уже присутствуют дымовые или пламенные проявления либо наблюдается значительное повышение температуры. Между тем на докритическом этапе формируется тепловой конвекционный поток, сопровождающийся низкочастотными колебаниями показателя преломления (2–20 Гц), которые не фиксируются стандартными сенсорами. Это определяет необходимость разработки методики, способной регистрировать слабовыраженные признаки термодинамических изменений до появления визуальных эффектов.

В работе реализован комплексный подход к раннему обнаружению признаков термодинамической активности газовой среды, основанный на разработанной методике

комбинированной диагностики и созданных аппаратных средств. Для практической реализации подхода разработан прибор диагностики воздушной среды, включающий два функциональных канала: лазерно-оптический канал, обеспечивающий регистрацию теплового конвекционного потока и аэрозольных включений, и матричный спектральный канал, предназначенный для селективной регистрации спектральных признаков пламени и тепловых неоднородностей. Общая структурная схема прибора представлена на рис. 1.

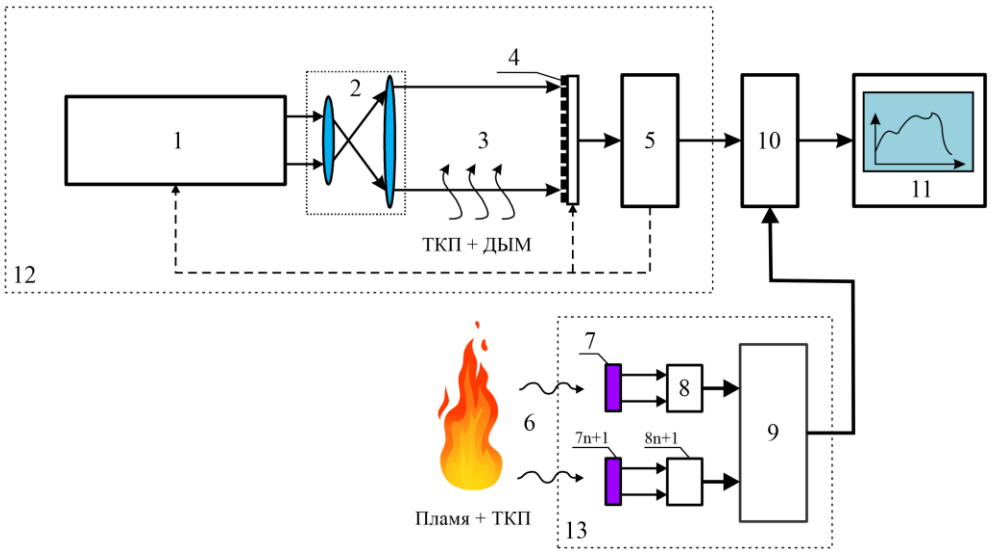


Рис. 1. *Структурная схема прибора диагностики воздушной среды для раннего селективного обнаружения признаков возгорания: 1 – лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – тепловой конвекционный поток; 4 – ПЗС-линейка; 5 – блок регистрации; 6 – тепловой конвекционный поток; 7, 7n+1 – узкополосный интерференционный фильтр; 8, 8n+1 – фотоэлектронный преобразователь; 9 – блок регистрации; 10 – ЭВМ со встроенным программным обеспечением; 11 – дисплей; 12 – лазерно-оптический канал; 13 – матричный спектральный канал*

Для обработки данных разработана методика, основанная на алгоритмическом комплексе, включающем быстрое преобразование Фурье, непрерывное вейвлет-преобразование, суммарно-разностную функцию, взаимно-корреляционную функцию дискретного сигнала, кепстральное преобразование и бинарную фильтрационную функцию. Совместное применение указанных компонентов алгоритмического комплекса обеспечивает устойчивое выделение признаков термодинамической активности и дифференциацию источников теплового воздействия на фоне шумов.

Экспериментальные исследования подтвердили корректность предложенной методики. Показано, что прибор обеспечивает снижение ложных срабатываний до 75%, повышение точности классификации до 96% и уменьшение времени отклика до значений менее 0,3 с. Результаты анализа полученных сигналов при помощи матричного спектрального прибора, представленные в виде вейвлет-спектров и бинарных индикаторов активности при различных длинах оптического тракта, приведены на рис. 2–3.

Дополнительные эксперименты с использованием лазерно-оптического канала показали, что при увеличении длины оптического тракта до 8 м чувствительность системы возрастает, а доминирующие признаки переходят от корреляционных и энергетических к вейвлетным и кепстральным. Соответствующие результаты представлены в виде вейвлет-спектра сигнала и бинарного индикатора термодинамической активности, приведённых на рис. 4–5. Полученные данные подтверждают эффективность предложенной методики, её устойчивость к шумам и способность к локализации энергетических проявлений в газовой среде.

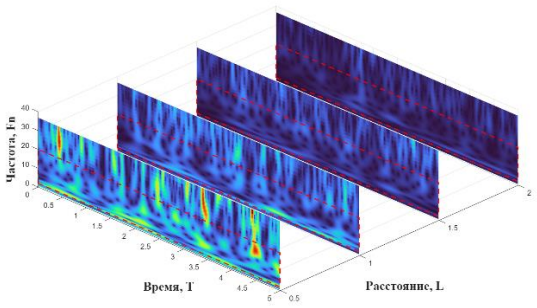


Рис. 2. *Вейвлет-спектры сигнала при длине тракта 0.5, 1, 1.5 и 2 м*

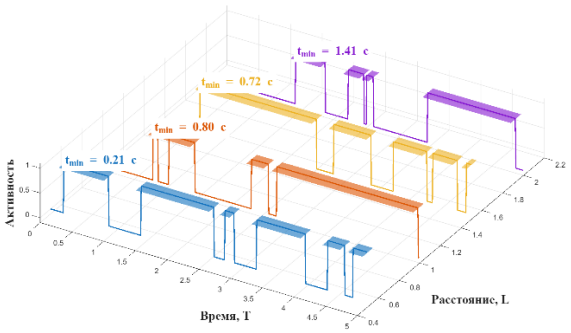


Рис. 3. *Бинарные индикаторы активности при длине тракта 0.5, 1, 1.5 и 2 м*

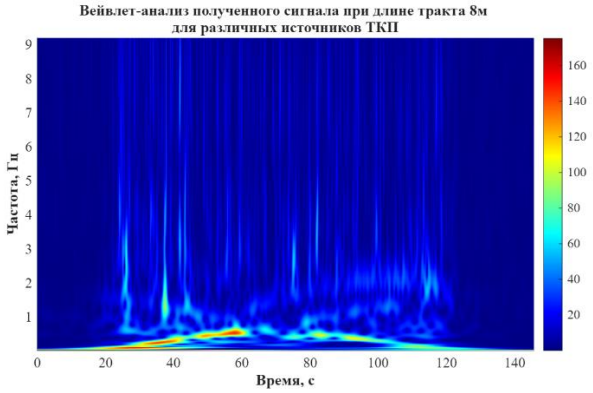


Рис. 4. *Вейвлет-спектр сигнала при длине тракта 8м для различных источников ТКП*

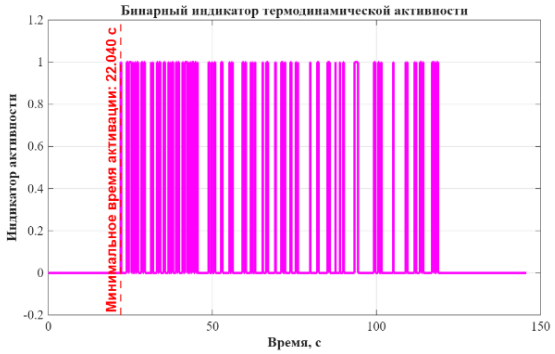


Рис. 5. *Бинарный индикатор термодинамической активности в среде при длине тракта 8м для различных источников ТКП*

Сравнение с промышленными извещателями Honeywell FS20X и «Тюльпан 2-14» показало, что разработанная система превосходит их по спектральной селективности, устойчивости к внешним возмущениям и способности выявлять переходные процессы. Методика может применяться в системах промышленной безопасности, экологического мониторинга и автономных комплексах; конструкция совместима со стационарными и мобильными платформами, что облегчает внедрение и снижает эксплуатационные затраты.

Разработанные приборы и методика обеспечивают высокую чувствительность, селективность и устойчивость к внешним возмущениям, что подтверждено экспериментальными исследованиями и сопоставлением с промышленными аналогами. Полученные результаты обладают высокой практической значимостью и могут быть использованы при создании современных систем пожарной диагностики.

С. А. Покотило, К. В. Кайков
Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОФОТОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Аннотация. Представлен облик гетерофотонной цифровой системы передачи информации, обеспечивающей возможность одновременной передачи радиосигналов, сигналов акустической эмиссии и звуковых сигналов, что существенно расширяет функциональные возможности фотонных атмосферных и волоконно-оптических систем этого класса. Предложенное авторами использование оптоволокна из новых материалов и многочастотных лазеров позволяет увеличить дальность и скорость передачи.
Ключевые слова: гетерофотонная система передачи, многочастотный лазер, халькогенидное, галогенидное оптоволокно, скорость передачи.
Для цитирования: Покотило С. А., Кайков К. В. Цифровые системы передачи на основе гетерофотонной технологии // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

S. A. Pokotilo, K. V. Kaykov
Military Innovative Technopolis «ERA», Anapa, Russian Federation

DIGITAL TRANSMISSION SYSTEMS BASED ON HETEROPHOTONIC TECHNOLOGY

Abstract. The paper presents a heterophotonic digital information transmission system that enables the simultaneous transmission of radio signals, acoustic emission signals, and audio signals, significantly expanding the functionality of photonic atmospheric and fiber-optic systems of this class. The authors propose the use of fiber optics made from new materials.
Keywords*:* heterophoton transmission system, multi-frequency laser, chalcogenide, halide optical fiber, transmission speed.
For citation*:* Pokotilo S. A., Kaikov K. V. Digital transmission systems based on heterophoton technology // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

В современном мире наблюдается бурное развитие *фотонных* технологий для систем передачи, обработки, хранения и защиты информации и *транспортных* технологий «для различных сфер применения», входящих в «Приоритетные научно-технологические направления и перечень важнейших наукоёмких технологий» развития страны в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 18.06.2024 г. № 529. Наряду с этим в некоторых приложениях возникает необходимость высокоскоростной передачи разнородной информации для управления техническими объектами и контроля их технического состояния.

В настоящее время широкую известность получили радиофотонные системы передачи информации, основу которых составляет передача информационных радиосигналов (в радиосвязи и радиолокации) с помощью оптического (лазерного) излучения несущей частоты. Однако в целом ряде прикладных задач требуется передача и обработка с помощью оптического излучения информационных сигналов различной физической

природы. Так, по аналогии с радиофотоникой, интерес представляют ещё два направления развития ***фотонных*** систем передачи и обработки информации: ***акустофотоника***, которая изучает взаимодействие информационных акустических сигналов с оптическим излучением, и ***акустико-эмиссионная фотоника***, изучающая взаимодействие информационных сигналов акустической эмиссии с оптическим излучением.

Как известно, сигналы акустической эмиссии несут информацию о развивающихся дефектах в крупных резервуарах, особенно в находящихся под давлением, в конструкциях зданий и сооружений, особенно потенциально опасных объектов, радиолокационных станций дальнего обнаружения, а также в мостовых конструкциях высокоскоростных железнодорожных и автомагистралей, мостовых сооружений и трубопроводов. В связи с этим представляется актуальной задача создания систем передачи, обеспечивающих передачу и обработку информационных сигналов различной физической природы, – ***гетерофотонных систем передачи***. В статье рассматривается облик гетерофотонной цифровой волоконно-оптической системы передачи информации в виде сигналов акустической эмиссии, акустических (звуковых) и радиосигналов.

Гетерофотонной (от лат. *гетеро – разный*) цифровой волоконно-оптической системой передачи будем называть систему, осуществляющую передачу информационных (аналоговых или дискретных) сигналов различной физической природы с помощью промодулированного ими лазерного излучения, их преобразование в цифровую форму и цифровую обработку с целью дальнейшего использования и с возможностью обратного, цифро-аналогового, преобразования.

Цель статьи – обосновать облик гетерофотонной цифровой волоконно-оптической системы передачи, обладающей расширенными функциональными возможностями за счёт одновременной передачи сигналов различной физической природы на нескольких десятках оптических несущих частот, различающихся длиной волны лазерного излучения, что обеспечивают многочастотные лазеры, а также за счёт применения новых материалов для оптоволокна.

Известные аналоги содержат последовательно соединённые оптический передатчик, оптическую среду передачи оптического сигнала, например, в виде оптоволоконного кабеля, оптоэлектронный приёмник и оконечное устройство. Но наиболее близкой к создаваемому облику информации является система волоконно-оптической связи, описанная в патенте *RU* 2798490, приор. 05.05.2022 г., и включающая в себя оптический передатчик, электрооптический модулятор, фотоприёмник и аналого-цифровой преобразователь, соединённые последовательно, при этом оптический выход модулятора и вход фотоприёмника соединены волоконно-оптическим кабелем.

Недостатком описанного аналога является невозможность использования для передачи, приёма и обработки информационных сигналов различной физической природы: речевых сообщений, сигналов акустической эмиссии и радиосигналов, – что сужает функциональные возможности системы передачи и снижает надёжность передачи.

Предлагается расширить функциональные возможности волоконно-оптической системы передачи за счёт введения в неё датчика акустических сигналов, датчика сигналов акустической эмиссии, датчика радиосигналов, трёх формирователей этих сигналов, соединённых последовательно с соответствующими датчиками, электронного сумматора. Волоконно-оптическая система передачи выполнена трёхканальной, оптический передатчик представляет собой передающий оптический модуль, включающий в себя многочастотный или перестраиваемый по частоте лазер с формирующей оптической системой, излучающий на n длинах волн и соединённый посредством волоконно-оптического кабеля, состоящего из n оптических волокон, с блоком электрооптических модуляторов, который включает в себя три электрооптических модулятора, включённых параллельно и работающих на n длинах волн, при этом $n=n_1+n_2+n_3$, из которых оптические несущие в количестве n_1 промодулированы выходными сигналами датчика

акустических сигналов, n_2 – выходными сигналами датчика акустической эмиссии, n_3 – выходными сигналами датчика радиосигналов, при этом формирователи информационных сигналов осуществляют их предварительное усиление и дискретизацию, n выходов электрооптических модуляторов с помощью волоконно-оптического кабеля оптически сопряжены в каждом канале через объектив с фотоприёмником, выполненным матричным с m чувствительными элементами и функционально входящим в состав акустофотонного, акустико-эмиссионно-фотонного и радиофотонного аналого-цифровых преобразователей, выходы которых соединены с многоканальным входом цифрового сумматора, выход которого соединён с входом вычислителя, содержащего процессор, память и цифро-аналоговый преобразователь, при этом волоконно-оптический кабель выполнен из халькогенидного, галогенидного или фторидного оптического стекла, а цифровой сумматор выполнен с возможностью линейного суммирования информационных сигналов, передаваемых с помощью n_1, n_2, n_3 оптических несущих, и среднеквадратичного суммирования внутренних шумов каждого канала передачи. Датчик акустических сигналов предназначен для передачи речевых сообщений. Датчик сигналов акустической эмиссии представляет собой систему параллельно соединённых пьезоэлектрических преобразователей, предназначенных для регистрации и передачи информационных сигналов о развивающихся дефектах в объектах контроля, которыми могут быть силовые конструкции и цистерны, особенно ёмкости, находящиеся под давлением, и/или заполненные агрессивными жидкостями, трубопроводы, двигательные установки и др. Датчик радиосигналов, или радиоприёмник, или радиолокационный приёмник, предназначен для приёма и обработки информационных радиосигналов, несущих в том числе и видеоинформацию (в виде, например, телевизионных и/или тепловизионных изображений, передаваемых по радиоканалу).

Гетерофотонный аналого-цифровой преобразователь выполнен трёхканальным. Каждый его канал представляет собой функционально и конструктивно связанные блок приёмной оптики, оптический разветвитель, блок быстродействующих фотоприёмников (приёмный оптический модуль), блок высокочастотных электронных компараторов, генератор тактовых импульсов и цифровой сумматор, при этом блок формирователей сигналов включает в себя формирователи акустических сигналов, сигналов акустической эмиссии и радиосигналов, выходы которых электрически соединены с параллельно включёнными электрооптическими модуляторами, оптические выходы электрооптических модуляторов посредством волоконно-оптических кабелей через приёмную оптику и разветвитель в виде «полупрозрачных» зеркал или в виде оптоволоконного разветвителя соединены с фотоприёмниками блока фотоприёмников, которые последовательно своими выходами соединены с входами многоканального электронного компаратора (формирователя любого из 1…N разрядов цифрового сигнала), выход блока электронного компаратора соединён с электрическими входами цифрового сумматора и далее – с вычислителем, при этом последовательно соединённые блок электрооптических модуляторов, разветвитель, фотоприёмник и электронный компаратор представляют собой формирователи каждого из 1…N-го разрядов цифрового сигнала и включены параллельно друг другу. Количество электрооптических модуляторов, количество чувствительных элементов фотоприёмника, количество оптических волокон в оптоволоконном кабеле, соединяющем блок электрооптических модуляторов с выходом передающего оптического модуля, и количество оптических волокон в оптоволоконном кабеле, соединяющем выходы электрооптических модуляторов с чувствительными элементами матричного фотоприёмника, равно количеству длин волн излучения многочастотного лазера, а аналого-цифровой преобразователь выполнен трёхканальным фотонным.

Использование n несущих частот оптического излучения для передачи информационных сигналов различной физической природы обеспечивает существенное увеличение объёма и скорости передачи информации.

Н. А. Прохоров[1], В. П. Шпак[2]
[1]Кубанский государственный университет, Краснодар, Российская Федерация
[2]АО «Краснодарский приборный завод «Каскад», Краснодар, Российская Федерация

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ LIDAR-СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ

Аннотация. Для систем автономной навигации и дистанционного зондирования требуются компактные твердотельные лазерные системы с модуляцией добротности, работающие в спектральном диапазоне прозрачности атмосферы (3–5 мкм). Для этих целей необходимы оптические материалы с высокой лучевой стойкостью. В работе проведено численное моделирование усиления в резонаторе с пассивным затвором на основе шпинельной керамики Fe:$ZnGaAlO_4$. Показано, что экспоненциальный рост энергии излучения при многократном проходе обеспечивает пиковую мощность, достаточную для дальномерных задач. Экспериментально определена лучевая стойкость образца Fe:$ZnGaAlO_4$, которая составляет 73,2 Дж/см^2. Эти параметры способны обеспечить устойчивую работу сканирующей системы при средних мощностях нагрузки на оптический затвор до 1,28 мВт.
Ключевые слова: пассивный оптический затвор, LiDAR, модуляция добротности, лучевая стойкость, оптическая керамика, наносекундный импульс, Fe:$ZnGaAlO_4$.
Для цитирования: Прохоров Н. А., Шпак В. П. Энергетическое моделирование лазерных излучателей для LiDAR-систем на основе оптической керамики Fe:$ZnGaAlO_4$ // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

N. A. Prokhorov[1], V. P. Shpack[2]
[1]Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation
[2]AO «KPZ «Kaskad», Krasnodar, Russian Federation

ENERGY MODELING OF LASER EMITTERS FOR LIDAR SYSTEMS BASED ON OPTICAL CERAMICS

Abstract. Autonomous navigation and remote sensing systems require compact solid-state lasers with high radiation resistance. This work presents numerical modeling of gain in a resonator with a passive Q-switch based of Fe:$ZnGaAlO_4$ spinel ceramics. It is shown that the exponential growth of radiation energy under multiple passes provides peak power sufficient for ranging tasks. The radiation resistance of the sample has been experimentally determined to be 73.2 J/cm^2, ensuring stable operation at average load powers on the optical Q-switch of up to 1.28 mW.
Keywords: passive optical Q-switch, LiDAR, Q-switching, laser-induced damage threshold, optical ceramics, nanosecond pulse, Fe:$ZnGaAlO_4$.
For citation: Prokhorov N. A., Shpack V. P. Energy modeling of laser emitters for LiDAR systems based on optical ceramics // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Современные системы оптической локации предъявляют высокие требования к источникам зондирующего излучения: длительность импульса не превышает единиц наносекунд, а пиковая мощность обеспечивает дальность более 150 метров при работе в условиях атмосферных помех. Критическим элементом конструкции является пассив-

ный оптический затвор, основанный на принципе насыщающегося поглощения. Переход в ближний инфракрасный диапазон и высокая частота импульсов до 20 кГц создают экстремальные тепловые нагрузки на материал затвора, поэтому его лучевая стойкость становится критическим параметром, ограничивающим ресурс работы лидара. Цель данной работы – численная оценка выходных энергетических характеристик лазерного излучателя на основе керамики $Fe:ZnGaAlO_4$ и определение её пригодности для использования в сканирующих системах дистанционного зондирования.

Проведено моделирование процесса усиления в оптическом резонаторе с пассивным затвором. Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка описывалось функцией Гаусса. Расчёт коэффициента усиления выполнялся для многопроходного режима с учетом концентрации активных центров и сечения вынужденного излучения. Установлена, что для выхода на режим генерации большого импульса требуется менее 25-30 проходов, при этом накопленная инверсия населённостей расходуется в основном на последних проходах, что обеспечивает высокий контраст излучения и подавление паразитной предгенерации. Согласно расчётам, при частоте следования 16 кГц пиковая мощность импульса может достигать значений порядка несколько сотен киловатт, что достаточно для получения стабильного отражённого сигнала от объектов с низкой отражательной способностью на дистанциях до 250 метров.

Для верификации тепловой стабильности материала проведены эксперименты по облучению образцов лазером на парах меди с длительностью импульса 20 нс и средней мощностью 10 Вт. Расчёт реальной энергии воздействия выполнялся с учётом только длительности активных импульсов без учёта пауз между ними. Тёмно-красный образец $Fe:ZnGaAlO_4$ продемонстрировал высокую устойчивость, выдержав накопленную энергию 2,304 Дж за 30 минут непрерывного облучения без образования видимых повреждения. Для сравнения, образец $Fe:ZnAl_2O_4$ разрушился при энергии 0,115 Дж уже через 90 секунд. Таким образом, введение ионов галлия в матрицу шпинели приводит к значительному повышению теплопроводности и снижению концентрации дефектных центров поглощения. Полученный порог разрушения на два порядка превышает расчётную энергию одного лазерного импульса, что гарантирует практически неограниченный ресурс работы затвора в условиях высокочастотной импульсной нагрузки. Сравнение с традиционными затворами $Cr^{4+}:YAG$ показывает, что $Fe:ZnGaAlO_4$ является перспективным материалом для создания пассивных затворов в лазерных сканирующих системах для среднего ИК диапазона и в окнах прозрачности атмосферы диапазона 3-5 мкм. Высокая лучевая стойкость и спектральные характеристики в среднем ИК-диапазоне оптического материала $Fe:ZnGaAlO_4$ делает его потенциально эффективным для задач высокоточного 3D-картографирования, автономной навигации и аэрокосмического мониторинга. Разработанный расчётный аппарат может быть использован для прогнозирования выходных характеристик лазерных систем при вариации параметров активной среды и резонатора.

М. Ю. Прудникова, Д. В. Белякова, Д. Д. Бутманов, И. С Маринкин, Т. П. Савчук
Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАССИВОВ НАНОТРУБОК АНОДНОГО ОКСИДА ТИТАНА

Аннотация. Исследовано влияние параметров отжига на оптические свойства массивов нанотрубок анодного оксида титана (НТАОТ). Двухстадийным анодированием (60 В, 25 °С) сформированы НТАОТ с двухслойным строением стенок. Спектроскопией диффузного отражения с пересчётом по Кубелке – Мунку определены оптимальные условия отжига: 300 °С и 20–30 мин. Этот режим обеспечивает сохранение углерода и высокие значения коэффициента оптического поглощения.
Ключевые слова: электрохимия, нанотрубки, оксид титана, время отжига, оптические свойства, покрытия.
Для цитирования: Прудникова М. Ю., Белякова Д. В., Бутманов Д. Д., Маринкин И. С., Савчук Т. П. Влияние времени термической обработки на оптические свойства массивов нанотрубок анодного оксида титана // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

M. Y. Prudnikova, D. V. Belyakova, D. D. Butmanov, I. S. Marinkin, T. P. Savchuk
National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russian Federation

THE EFFECT OF HEAT TREATMENT TIME ON THE OPTICAL PROPERTIES OF ANODIC TITANIUM OXIDE NANOTUBE ARRAYS

Abstract. The paper studies the influence of annealing parameters on the optical properties of anodic titanium oxide nanotube arrays (ATANT). ATANT with a two-layer wall structure were formed using two-stage anodization (60 V, 25°C). Diffuse reflectance spectroscopy with Kubelka–Munk renormalization was used to determine the optimal annealing conditions: 300°C and 20–30 min. This regime ensures the preservation of carbon and high values of the optical absorption coefficient.
Keywords: electrochemistry, nanotubes, titanium oxide, annealing time, optical properties, coatings.
For citation: Prudnikova M. Y., Belyakova D. V., Butmanov D. D., Marinkin I. S., Savchuk T. P. The effect of heat treatment time on the optical properties of anodic titanium oxide nanotube arrays // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Массивы нанотрубок анодного оксида титана (НТАОТ), сформированные электрохимическим окислением в органических электролитах, обладают выраженной двуслойной структурой стенок. По данным просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения и энергодисперсионного рентгеновского анализа, внешний слой представлен аморфным оксидом титана (TiO_2) с минимальным содержанием примесей, а внутренний содержит углеродсодержащие продукты разложения органического электролита в котором был процесс электрохимического окисления. Последующий отжиг на воздухе при температурах 400–550°С обеспечивает кристаллизацию аморфной фазы с переходом в анатаз, однако приводит к полному удалению углерода из структуры. Низкотемпературная обработка (200–350°С), напротив, позволяет сохранить повышенную

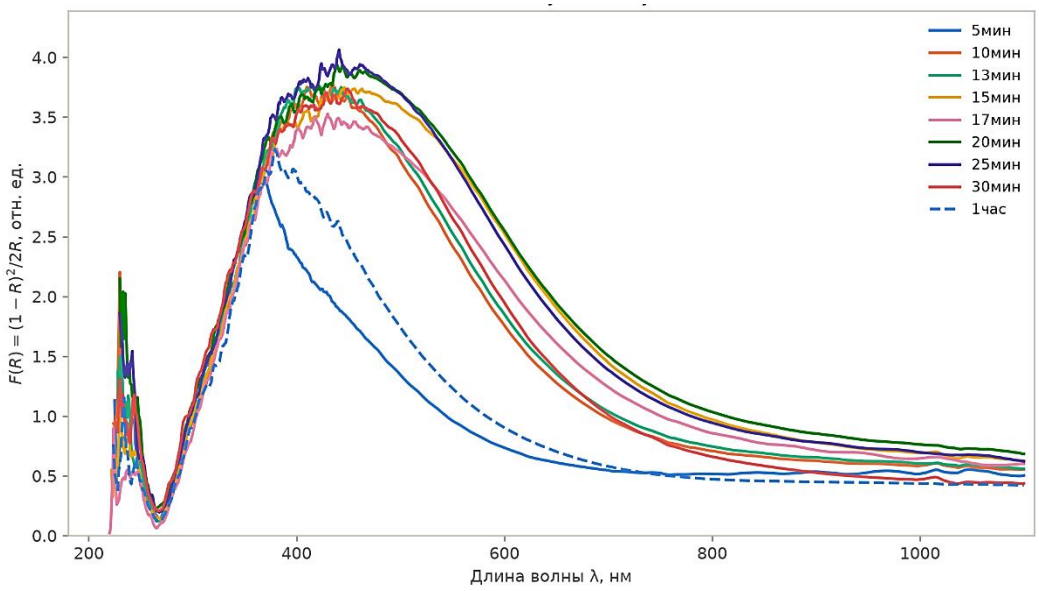
концентрацию углеродных соединений в структуре, что является определяющим фактором для оптических характеристик и создания эффективных светопоглощающих покрытий на их основе. Наряду с температурой, продолжительность (время) отжига оказывает влияние на степень кристалличности и оптические свойства наноструктур, определяя и коэффициент поглощения света. В связи с этим установление оптимального соотношения температуры и времени термической обработки критически важно для управления спектральным диапазоном чувствительности материала.

Формирование массивов НТАОТ осуществляли двухстадийным анодированием титана в потенциостатическом режиме при постоянном напряжении 60В. Электрохимический синтез проводили в термостатируемой ячейке в растворе электролита на основе этиленгликоля при постоянной температуре 25°С. Полученный слой нанотрубок удаляли с титановой фольги методом катодного отслаивания в растворе электролита на основе серной кислоты. Первый этап необходим для увеличения степени упорядоченности будущего массива НТАОТ. Второй этап анодного окисления проводился при одинаковом числе заряда, прошедшего через систему, для того что бы полученный массив нанотрубок анодного оксида титана имел одинаковую длину структуры для всех исследуемых образцов. Термическую обработку массивов НТАОТ после формирования и промывки в спирте проводили в воздушной атмосфере. Отжиг проводили в день синтеза образца.

Морфологию поверхности полученных образцов изучали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Для анализа оптических характеристик покрытий применили ИК-спектроскопию и спектроскопию диффузного отражения света. Полученные спектры отражения были пересчитаны с использованием функции Кубелки – Мунка для расчёта коэффициентов поглощения материала.

До проведения работ по формированию массивов нанотрубок анодного оксида титана было решено, что необходимо получить слой одинаковой толщины у всех исследуемых образцов. Для этого был использован подход по контролю толщины массивов нанотрубок анодного оксида титана за счет пропускания в ходе анодного окисление одинаковое количество кулон, равное 29,3 Кл. Что бы определить действенность данного подхода, были получены изображения сколов слоя анодного оксида с помощью растровой электронной микроскопии, в результате было установлено, что массив нанотрубок анодного оксида титана с преимущественно вертикальной ориентацией относительно поверхности подложки. Стенки нанотрубок имеют чётко выраженные границы. На основании анализа поперечного среза можно сделать вывод, что высота нанотрубок превышает их диаметр (высокое аспектное соотношение). При масштабировании относительно контрольной линейки ориентировочная длина нанотрубок составляет порядка нескольких микрометров. Данная морфология характерна для режимов анодирования с контролируемой кинетикой роста. При помощи программы ImageJ была проанализирована длина полученных структур, которая составляет ~2,0-2,5 мкм, вероятно разброс по длине связан с локальной неоднородностью исследуемых образцов.

Предварительный анализ температурных режимов термической обработки показал, что оптимальной температурой отжига массивов НТАОТ является 300 °С, при которой коэффициент поглощения материала превышает 60 %. На следующем этапе было изучено влияние продолжительности отжига при фиксированной температуре (300 °С) на спектральные характеристики образцов (см. рис.).



Зависимость коэффициента поглощения нанотрубок анодного оксида титана от времени термической обработки при 300 °C

Коэффициент оптического поглощения, представленный на рисунке рассчитывали путем интегрирования в спектральном диапазоне 280–1200 нм. При малой длительности отжига (до 20 мин) термических превращений остаточных продуктов разложения этиленгликоля не происходит, что подтверждается значениями оптического поглощения. Увеличение времени термообработки свыше 30 минут приводит к интенсивному выгоранию углерода, сопряженному со снижением коэффициента оптического поглощения материала. Оптимальным является интервал выдержки 20–30 мин, при котором достигаются максимальные значения поглощения, обусловленные высоким содержанием углерода. Кроме того, наблюдается сдвиг края оптического поглощения: для образца с временем отжига 5 мин. край поглощения расположен при ~380 нм, а при увеличении выдержки до 60 мин он смещается в длинноволновую область до ~420 нм.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №26-79-10331.

И. П. Руденок, А. И. Руденок
Волгоградский государственный университет, Волгоград, Российская Федерация

АДАПТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Аннотация. Представлен анализ вариаций комплекса поляризационных оптических характеристик плавнонеоднородных типов атмосферных аэрозолей с модельными пространственно-градиентными показателями преломления различных включений.
Ключевые слова*:* оптика атмосферы, пространственно-градиентные показатели преломления, аэрозольная дисперсная среда.
Для цитирования*:* Руденок И. П., Руденок А. И. Адаптивная коррекция амплитудно-фазовой корреляции атмосферных искажений оптического излучения // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

I. P. Rudenok, A. I. Rudenok
Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation

ADAPTIVE CORRECTION OF THE AMPLITUDE-PHASE CORRELATION OF ATMOSPHERIC DISTORTIONS OF OPTICAL RADIATION

Abstract. The report presents an analysis of variations in the set of optical polarization characteristics of smoothly inhomogeneous atmospheric aerosol types with model spatially gradient refractive indices for various inclusions.
Keywords*:* atmospheric optics, spatially varying refractive indices, aerosol disperse medium.
For citation*:* Rudenok I. P., Rudenok A. I. Adaptive correction of the amplitude-phase correlation of atmospheric distortions of optical radiation // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Работа посвящена исследованию взаимодействия электромагнитного излучения с атмосферными аэрозолями. Эта тематика является активно развивающейся в современной оптике и физике атмосферы.

Проведён анализ поляризационных оптических характеристик плавнонеоднородных типов атмосферных аэрозолей с модельными пространственно-градиентными показателями преломления примесных частиц с учётом магнитоэлектрических проницаемостей. Таким образом, рассмотрено взаимодействие электрических и магнитных дипольных моментов, наведённых в молекулах частиц рассеивающего вещества микрофизическими полями проходящей световой волны. Найдены условия, допускающие существование в аэрозольной дисперсной среде как поперечных, так и продольных вторичных волн. Распространение одновременно продольных и поперечных волн не допускается. Проведённые вычислительные эксперименты позволяют утверждать, что энергетические коэффициенты отражения и прохождения крайне чувствительны к характеру и масштабу неоднородности аэрозоли вблизи точки бифуркации, определяемой условием существования поперечных волн. За счёт несимметричности результирующих распределений показателя преломления проявляется зависимость постоянной распространения волны от направления вектора поляризации. Различна также величина максимальной модуляции показателя преломления для различных состояний поляризации.

Отмечено, что при прохождении через неоднородную аэрозольную дисперсную среду оптических волн происходит их линейная трансформация. Получены выражения, связывающие отношение поперечных составляющих вектора электрического поля с параметрами неоднородности аэрозольной среды и определяющие вариации интенсивности и поляризации волн (вращение плотности поляризации, направление вращения, эллиптичность), а также параметры Стокса и степень поляризации.

А. А. Шкаев
Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ ПИРОМЕТРОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Аннотация. Предложено использовать для контроля температуры футировки реактора технического углерода пирометр спектрального отношения. Данный пирометр реализован на двух односпектральных фотоприемниках, работающих в разных спектральных диапазонах, объединенных в один оптический канал. Оптическая схема пирометра обеспечивает беспаралаксное визирование.
Ключевые слова*:* пирометр спектрального отношения, беспаралаксное визирование.
Для цитирования*:* Шкаев А. А. Применение пирометров в производстве технического углерода // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. A. Shkaev
Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

APPLICATION OF PYROMETERS IN THE PRODUCTION OF CARBON BLACK

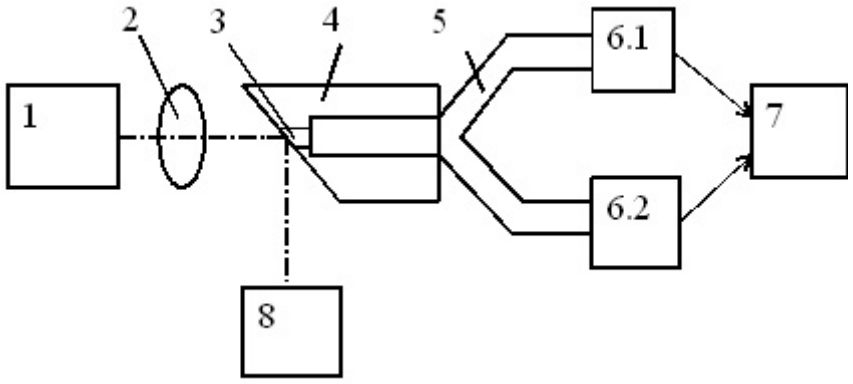
Abstract. It is proposed to use a spectral ratio pyrometer to monitor the temperature of the carbon black reactor lining. This pyrometer is implemented using two single-spectrum photodetectors operating in different spectral ranges, combined into a single optical channel. The pyrometer's optical design ensures parallax-free sighting.
Keywords*:* spectral ratio pyrometer, parallax-free sighting.
For citation*:* Shkaev A. A. Application of pyrometers in the production of carbon black // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Актуальность

В настоящее время практически во всех отраслях промышленности стоит задача измерения температуры. Так, на одном из крупнейших производств технического углерода, а именно ОАО «Омсктехуглерод» стоит задача измерения температуры стенки реактора обжига углерода. Эта задача осуществляется посредством бесконтактной пирометрии. Проблема заключается в том, что чем выше температура обжига, тем выше коэффициент полезного действия реакции производства техуглерода. Превышение температуры футировки реактора более 1900 – 2000 ^{o}C не допустимо, т.к. это может привести к расплаву стенки реактора. В связи с этим точность измерения температуры должна быть высокой, а выходной сигнал пирометра заведен в систему АСУТП. Кроме того, контроль температуры осуществляется через смотровое окно, а производство техуглерода является грязным. При загрязнении смотрового окна значительно снижаются показания пирометра, что является не допустимым. Это усложняет процесс обслуживания системы измерения температуры (необходимо периодически очищать оптический канал). В связи с этим в данной работе предлагается использовать пирометры спектрального отношения для уменьшения зависимости точности измерения температуры футировки от прозрачности оптического канала.

Постановка задачи

В современных пирометрах спектрального отношения применяются специализированные фотосенсоры. В таких фотоприемниках применяется несколько чувствительных элементов работающих в разных спектральных диапазонах. В данной работе предлагается использовать два отдельных односпектральных фотоприемников объединенных в один оптический канал. Кроме того предложена оптическая схема позволяющая обеспечить беспаралаксное визирование пирометра на объект контроля. Функциональная схема пирометра представлена на рисунке.



Функциональная схема пирометра:
1 – объект контроля; 2 – объектив;
3 – полевая диафрагма; 4 – полированная поверхность зеркала;
5 – оптический канал; 6.1, 6.2 – фотоприемники;
7 – измерительный преобразователь; 8 – окуляр

Принцип работы

Поток излучения от объекта контроля 1 через объектив 2 попадает на полированную поверхность 4 зеркала. Этой зеркальной поверхностью, находящейся под углом 45° поток излучения делится на два направления. Один, пройдя через полевую диафрагму 3 делится на два потока разделенным надвое оптоволоконным кабелем 5 и попадает на приемники лучистой энергии 6.1 и 6.2. После преобразования приемниками электрический сигнал поступает на измерительный преобразователь 7, выходной сигнал которого соответствует измеряемой температуре объекта контроля. Второй канал от объекта контроля формирует изображение на окуляре 8.

Технические характеристики

Предполагаемые технические характеристики:

- диапазон измеряемых температур пирометрического преобразователя 1200 … 2300 °С;
- рабочая температура окружающей среды -30 … + 60 °С;
- погрешность 2 %;
- показатель визирования 1 : 100;
- инерционность измерения не более 2,5 с;
- время выхода на рабочий режим после вкл. не более 15 мин.;
- выходной сигнал пирометрического преобразователя: 4 … 20 мА.

Выводы

Использование данного пирометра для измерения температуры футировки реактора обжига технического углерода позволяет повысить коэффициент полезного действия обжига благодаря более точному контролю температуры футировки, уменьшая возможность её повреждения. Также увеличить период технического обслуживания.

А. А. Шкляев
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
Новосибирск, Российская Федерация
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

ЭКСТРЕМАЛЬНО СИЛЬНЫЕ И ШИРОКОПОЛОСНЫЕ АНТИОТРАЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ ТЕЛЛУРА

Аннотация. При температурах 230–300 °С выращены покрытия из массива наностолбцов Te. Они отражают менее 0,5% падающего света в диапазоне длин волн ~200–2500 нм и менее ~5% в диапазоне до 7000 нм. Такие покрытия формируются в условиях термодинамического равновесия между ростом (встраиванием атомов в растущий слой) и сублимацией. Большинство наностолбцов Te в массиве не соприкасаются друг с другом. Возбуждаемые в них оптические резонансы изменяют направление распространения света.
Ключевые слова: теллур, рост в термодинамически равновесных условиях, массивы наностолбиков, антиотражающие покрытия, текстурированные покрытия, оптические резонансы.
Для цитирования: Шкляев А. А. Экстремально сильные и широкополосные антиотражающие свойства покрытий из теллура // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества : тезисы докладов IV Международной научной конференции (6–8 октября 2026 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2026.

A. A. Shklyaev
Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

EXTREMELY STRONG AND BROADBAND ANTIREFLECTIVE PROPERTIES OF TELLURIUM COATINGS

Abstract. Coatings consisting of Te nanocolumn arrays were grown at temperatures of 230–300°C. They reflect less than 0.5% of incident light in the 200–2500 nm wavelength range and less than ~5% in the range up to 7000 nm. These coatings are formed under conditions of thermodynamic equilibrium between growth (the incorporation of atoms into the growing layer) and sublimation. Most of the Te nanocolumns in the array do not touch each other. Optical resonances excited in them alter the direction of light propagation.
Keywords: tellurium, growth under thermodynamic equilibrium conditions, nanocolumn arrays, antireflective coatings, textured coatings, optical resonances.
For citation: Shklyaev A. A. Extremely strong and broadband antireflective properties of tellurium coatings // Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter : Abstracts of the IV International Scientific Conference (October 6-8, 2026, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2026.

Антиотражающие свойства улучшаются за счет использования текстурированных поверхностей или покрытий из наночастиц полупроводниковых материалов с высоким показателем преломления. Мы получили покрытия, сочетающие эти два подхода. Нами разрабатывается технология роста покрытий в условиях термодинамического равновесия между ростом и сублимацией, которая обеспечивает формирование покрытий в виде массивов нанопроволок или наностолбиков теллура (рис. 1) при таких сравнительно низких температурах как 230–300 °С. Это происходит благодаря высокой скорости сублимации Te при температурах значительно ниже его точки плавления.

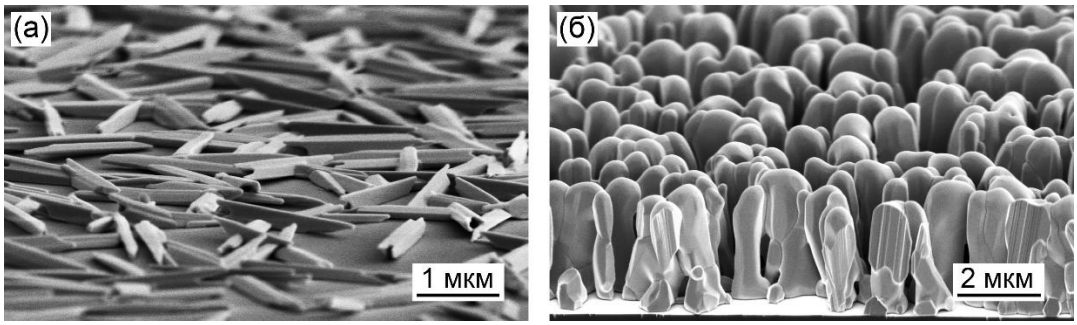


Рис. 1. *Изображения покрытий (а) из нанопроволок и (б) наностолбиков теллура, выращенных на подложке из кварца. Изображения получены при скользящем угле падения электронного пучка сканирующего туннельного микроскопа*

Нанопроволоки преимущественно ориентированы вдоль поверхности подложки. Они пересекаются и срастаются друг с другом (рис. 1*а*). Полученные покрытия являются текстурированными, в частности, за счёт наличия разброса частиц по высоте относительно подложки и зазоров между ними. При взаимодействии с падающим светом такие покрытия характеризуются градиентным показателем преломления, величина которого меняется от величины показателя преломления окружающей среды до его эффективного значения у границы раздела с подложкой. За счёт этого такие покрытия значительно уменьшают отражение и являются просветляющими.

Теллур обладает большим значением показателя преломления в диапазоне ~3,6–6,3 в зависимости от длины волны света и его кристаллической ориентации. При взаимодействии света с такими полупроводниковыми наночастицами в них возбуждаются сильные оптические резонансы типа Фабри-Перо и Ми. Резонансы захватывают падающий на них свет и излучают его в направлении в соответствии с пространственным распределением интенсивности резонансных магнитных и электрических полей. Это приводит к изменению направления распространения падающего света, направляя его вдоль поверхности подложки или под углом к ней. В результате значительно уменьшается как отражение (рис. 2*а*), так и пропускание света, так как из-за изменения его направления он не попадает на детектор спектрофотометра. Соответственно измерения показывают практически полное поглощение падающего света (рис. 2*б*).

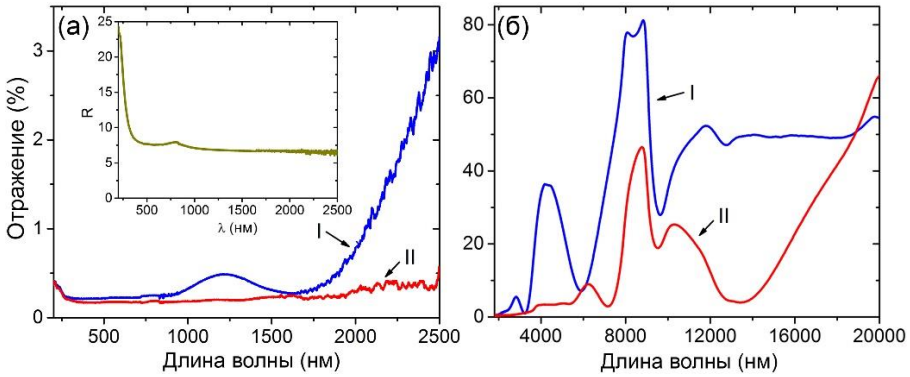


Рис. 2. (а, б). *Спектры отражения покрытий из наностолбиков теллура высотой (I) ~1300 и (II) 2500 нм в узком и широком спектральном диапазоне соответственно. На вставке представлен спектр отражения кварцевой подложки*

Таким образом отражательная способность полученных покрытий может составлять менее 0,5% в диапазоне длин волн ~200–2500 нм и менее ~5% в диапазоне до 7000 нм (рис 2а). Использование таких покрытий может повысить эффективность тонкоплёночных фотоэлектрических и фототермических преобразователей.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНВО РФ в рамках госзадания FWGW-2025-0014 ИФП СО РАН. Экспериментальные исследования проводились с использованием оборудования центров коллективного пользования АТИЦКП НГУ и «Наноструктуры» ИФП СО РАН.