



**VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
РАДИОТЕХНИКА,
ЭЛЕКТРОНИКА И СВЯЗЬ**

**ТЕЗИСЫ
ДОКЛАДОВ**

РЭИС-2•25

ОМСК 7-8 ОКТЯБРЯ

Правительство Омской области
Ордена Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский институт
автоматической аппаратуры им. академика В.С. Семенихина
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омский научный центр СО РАН
Институт радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН

РАДИОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И СВЯЗЬ

Тезисы докладов
VIII Международной научно-технической конференции

Омск, 7–8 октября 2025 г.

РЭиС-2025

ОМСК
2025

УДК 621.37.39
ББК 32.84
Р15

- Р15 Радиотехника, электроника и связь [Электронный ресурс] : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (Омск, 7–8 октября 2025 года). – Электрон. текст. дан. – Омск: ОНИИП, 2025. – 336 с. – URL: <https://oniip.ru/nauka/viii-mezhdunarodnaya-nauchno-tekhnicheskaya-konferentsiya-radiotekhnika-elektronika-i-svyaz/sbornik-tezisov-dokladov-reis-2025.php> – Режим доступа : свободный. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-6052462-1-3

УДК 621.37.39
ББК 32.84

Тезисы печатаются в авторской редакции, орфографии и пунктуации

Текстовое электронное издание (25,7Мб)
Самостоятельное электронное издание

Дата подписания к использованию: 11.11.2025

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

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

ISBN 978-5-6052462-1-3

© АО «ОНИИП», 2025
© Коллектив авторов, 2025

Международный программный комитет конференции

<i>Березовский В.А., Гуляев Ю.В.,</i>	генеральный директор АО «ОНИИП», Россия, – председатель ; академик РАН, научный руководитель ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Россия, – сопредседатель ;
<i>Асеев А.Л., Белый В.А.,</i>	академик РАН, ИФП СО РАН, Россия; академик НАН РБ, Институт физики им. Б.И. Степанова НАН РБ, Республика Беларусь;
<i>Ивашкин А.Н. Карпов В.В., Кольцов А.Г.,</i>	генеральный директор АО «ЦКБА», Россия; д-р экон. наук, директор ОНЦ СО РАН, Россия; канд. техн. наук, министр науки, высшего образования и научно- технологического развития Омской области, Россия;
<i>Корчагин П.А., Крячко А.Ф., Латышев А.В., Макаренко С.И., Никитов С.А., Посажеников А.В., Саломатов Ю.П., Сомников В.М.,</i>	д-р техн. наук, профессор, ректор ОмГТУ, Россия; д-р техн. наук, профессор, ГУАП, Россия; академик РАН, директор ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, Россия; д-р техн. наук, доцент, СпбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, Россия; академик РАН, директор ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Россия; министр промышленности и торговли Омской области, Россия; канд. техн. наук, профессор, СФУ, Россия; д-р физ.-мат. наук, профессор, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Республика Казахстан;
<i>Сороцкий В.А., Струнин В.И.,</i>	д-р техн. наук, доцент, СпбПУ, Россия; д-р физ.-мат. наук, профессор, ОмГУ им. Ф.М. Достоевского, Россия;
<i>Черепенин В.А., Шакин О.В., Шелупанов А.А., Шипилов С.Э.,</i>	академик РАН, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Россия; д-р техн. наук, ФТИ имени А.Ф. Иоффе РАН, Россия; д-р техн. наук, член-корр. РАН, ТУСУР, Россия; д-р физ.-мат. наук, НИ ТГУ, Россия.

Организационный комитет

<i>Кривальцевич С.В., председатель,</i>	АО «ОНИИП» (г. Омск);
<i>Сафонова О.А., ответственный секретарь,</i>	АО «ОНИИП» (г. Омск);
<i>Бадамшина П.А.,</i>	АО «ОНИИП» (г. Омск);
<i>Веремеев И.В.,</i>	АО «ОНИИП» (г. Омск);
<i>Давлеткильдеев Н.А.,</i>	АО «ОНИИП» (г. Омск);
<i>Доберштейн С.А.,</i>	АО «ОНИИП» (г. Омск);
<i>Зачатейский Д.Е.,</i>	АО «ОНИИП» (г. Омск);
<i>Козлов А.Г.,</i>	ОмГТУ (г. Омск);
<i>Машинская С.Г.,</i>	АО «ОНИИП» (г. Омск);
<i>Пономарева Е.С.,</i>	АО «ОНИИП» (г. Омск);
<i>Романов Ю.В.,</i>	АО «ОНИИП» (г. Омск);
<i>Шепет С.В.,</i>	АО «ОНИИП» (г. Омск);
<i>Яковлев А.Н.,</i>	АО «ОНИИП» (г. Омск);
<i>Яценко А.С.,</i>	ИРФЭ ОНЦ СО РАН (г. Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНАЯ ЧАСТЬ

<i>Давыдович А. В., Винс В. Я., Михайлов В. П.</i>	12
Единая система связи Арктического региона на базе научно-технических заделов АО «ОНИИП»	
<i>Киченко А. Н.</i>	16
Формализация функционирования и определение топологии сети космических аппаратов перспективной низкоорбитальной спутниковой системы	
<i>Хайретдинов М. С., Ковалевский В. В., Жостков Р. А., Преснов Д. А., Толочко В. В.</i>	18
Физические феномены в задачах дальнего распространения сейсмоакустических волн	

СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ И ЗОНДИРОВАНИЯ РАДИОЛИНИИ И РАДИОМОДЕМЫ

<i>Анишин М. М., Зачатейский Д. Е., Любчик В.-А. В., Соловьев А. А.</i>	21
Поддержка принятия решений при управлении КВ-радиосетью	
<i>Батенков К. А.</i>	25
Анализ ключевых временных параметров качества обслуживания в телекоммуникационных сетях	
<i>Бондарук А. Д., Пономарёв Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М.</i>	27
Воздушный эшелон орбитально-наземных спутниковых сетей: технологии и перспективы	
<i>Борисевич С. А.</i>	29
Принципы проектирования отказоустойчивых вычислительных кластеров высокой доступности	
<i>Ворошилов В. В., Иванов А. В., Романов Ю. В.</i>	32
Помехоустойчивость модифицированных алгоритмов демодуляции дискретных частотных сигналов в канале с АБГШ и сосредоточенными помехами	
<i>Зайцев В. В., Фадеев К. С., Авдеева К. В.</i>	35
Группы контролируемых и управляемых параметров в когнитивных радиолиниях ДКМВ различного назначения	
<i>Зубков М. П., Зачатейский Д. Е., Сысоев Д. В.</i>	37
Установка для сбора данных, необходимых для повышения достоверности прогноза характеристик ионосферных радиоканалов	
<i>Колобков А. В., Хитева Д. В.</i>	40
Особенности формирования низкоскоростных помехоустойчивых кодов	
<i>Колосов М. А.</i>	43
Аномальность состояния ионосферы как предиктор нарушения КВ-радиосвязи	
<i>Копылова О. А., Хайретдинов М. С.</i>	46
Повышение дальности обнаружения транспортных колебаний в шумах	
<i>Леванова Т. В.</i>	48
Один подход к решению задачи размещения радиовышек	
<i>Махманазаров Р. М., Суханов Д. Я.</i>	50
Использование вихревого волнового поля в системах радиоволнового зондирования	
<i>Митрохин В. Е., Наумов А. С., Попенко П. Г.</i>	53
Стойкость систем радиосвязи к электромагнитным воздействиям в зимних и летних условиях эксплуатации на полигоне	

<i>Скрипник И. В.</i>	56
Этапы обеспечения интероперабельности беспилотных авиационных систем	
<i>Черных В. Д., Вертоградов Г. Г.</i>	60
Оценка погрешности прогнозирования моделью IRI максимально применимой частоты по результатам наклонного ЛЧМ зондирования на трассах различной протяженности	
<i>Шагарова Л. В., Яценко А. С.</i>	63
Технологии дистанционного зондирования земли в решении практических задач радиосвязи: обзор и перспективы	
<i>Яценко А. С.</i>	66
О возможности использования спутниковых радиометрических данных при оценке радиофизических характеристик подстилающей поверхности в декаметровом диапазоне волн	
АНТЕННО-ПРИЕМНЫЕ И АНТЕННО-ПЕРЕДАЮЩИЕ СИСТЕМЫ, РАДИОСРЕДСТВА, ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ ПЛАТФОРМЫ, ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ	
<i>Агарков Н. Е.</i>	69
Анализ активной части импеданса согласующей цепи в режиме холостого хода при различных комбинациях индуктивных звеньев	
<i>Агарков Н. Е.</i>	73
Способ сокращения областей «пораженных» частот согласования системы «приземная укороченная антенна – антенное согласующее устройство» КВ-диапазона	
<i>Башкуев Ю. Б., Шунков А. Д.</i>	76
Обработка сигналов на фоне сетевых помех при регистрации гидроэлектрокинетического эффекта на берегу озера Байкал	
<i>Бобров П. П., Костычев Ю. А., Репин А. В., Родионова О. В.</i>	79
Широкополосные датчики для измерения диэлектрической проницаемости поверхностного слоя почв	
<i>Боровиков А. Ю., Борисов В. М., Соловьев А. В.</i>	82
Перспективы развития отечественной доверенной аппаратно-программной платформы для применения в средствах вычислительной техники	
<i>Бунин М. С., Дмитриев В. Т.</i>	84
Влияние уровня битрейта на алгоритмы аудиокодирования	
<i>Бутрик Р. Р.</i>	87
Об учете влияния местных помех различной природы на эффективность антенно-приемной системы КВ-диапазона	
<i>Бучельников А. В.</i>	90
Моделирование входного импеданса проволочной полуромбической антенны КВ-диапазона с учетом элементов трансформации	
<i>Варнаков С. А., Яценко А. С., Кривальцевич С. В., Клименко Т. Б., Никифорова А. О.</i>	94
Вариации диэлектрических характеристик разных типов почв лесостепной зоны юга Западной Сибири	
<i>Васенина А. А., Сидоренко К. А.</i>	96
Оценка точности модели NeQuick в период геомагнитных бурь	
<i>Глотов В. В., Майков Н. Д.</i>	99
Метод конечных элементов для решения задач ближнего электромагнитного поля печатных плат	
<i>Дмитриев В. Т., Ву Хоанг Шон</i>	101
Сжатие речевых сигналов на основе вейвлет-пакетного разложения	

<i>Егорова А. А.</i>	104
Актуальность испытаний радиопродукции на устойчивость к климатическим условиям	
<i>Ефремов А. Д.</i>	107
Моделирование плоской спиральной антенны с боковым выходом в двух исполнениях	
<i>Зудов Р. И., Сороцкий В. А., Треймут Н. А., Тетерин П. С.</i>	113
Повышение энергетических и качественных характеристик радиопередающего устройства на основе использования нейронных сетей	
<i>Клименко Т. Б., Варнаков С. А., Яценко А. С., Кривальцевич С. В.</i>	116
Особенности заземления мобильных комплексов КВ-диапазона в песчаном грунте	
<i>Костюченко В. В., Черепанов А. А.</i>	119
Метод простой калибровки ошибок смещения нуля и усиления для сигма-дельта аналого-цифровых преобразователей	
<i>Костычев Ю. А.</i>	123
Метод низкочастотной емкостной диэлектрической спектроскопии водных растворов солей	
<i>Майнелгер К. А.</i>	126
Результаты проектирования широкополосного согласующего устройства для несимметричного вертикального вибратора	
<i>Мелёшин Ю. М.</i>	130
Дерево агрегации функции неопределенности на базе частичной корреляции последовательностей	
<i>Меньшиков Д. М., Дмитриев В. Т.</i>	132
Создание глубоких нейронных сетей для кодирования речи с низкой скоростью передачи данных	
<i>Немчанов К. В., Яценко А. С.</i>	135
Моделирование влагопереноса в почве с использованием метода Пенмана-Монтейта для расчета испарения	
<i>Огуенко В. В.</i>	138
Система радиофизического мониторинга и идентификации БВС	
<i>Осовский А. В., Кутузов Д. В., Стукач О. В.</i>	141
Сети на кристалле с выявлением перегрузок	
<i>Подлиннов С. А., Фадеева Д. С., Фатеев А. В.</i>	144
Модернизированный алгоритм оценки диэлектрической проницаемости методом открытого конца коаксиальной линии	
<i>Сулима А. А.</i>	148
Поколения авиационных радиосредств и их особенности	
<i>Ташев Н. С.</i>	151
Особенности условий мест развертывания коротковолновых радиостанций на территории малых удаленных объектов	
<i>Шумилов Н. Н.</i>	153
Программно-аппаратный комплекс мониторинга сетевого трафика	
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ	
<i>Антипин Б. М., Виноградов Е. М., Мункуева О. Б.</i>	156
Анализ источников потенциальных внутренних помех радиоэлектронному оборудованию структурных элементов костюма телеприсутствия	

<i>Васильев А. И.</i>	159
Предложения по оценке качества видеоинформации в системах управления робототехнических комплексов	
<i>Васильева Т. Г., Лукьянчик В. Н.</i>	163
Настоящее и будущее робототехнических комплексов специального назначения	
<i>Набиев Ф. Р., Воронцов А. М., Ложников П. С., Лутченко С. С.</i>	165
Самоорганизующаяся система цифрового образа завода как инструмент быстрого развёртывания	
<i>Новоселов И. Н., Пономарёв Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М.</i>	167
Использование возможностей scada-систем при решении задач управления, диагностики технического состояния ка и обработки целевой информации	
<i>Покотило С. А.</i>	169
Экспериментальная оценка качества оптико-электронных систем дистанционного зондирования	
<i>Симонов К. О., Коняева О. С.</i>	172
Система управления процессом контроля качества на предприятиях по производству железобетонных изделий на основе технологии Интернета вещей	
<i>Сухарев Р. Ю.</i>	175
Концепция беспилотной роботизированной платформы для обеспечения связи в сложных условиях	

СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

<i>Березкин А. А., Ченский А. А.</i>	178
Исследование прикладных задержек и потерь кадров FPV-видеопотока в низкоорбитальной спутниковой системе Starlink при управлении БПЛА	
<i>Землянухин С. Ю.</i>	181
Сравнительный анализ линейных алгоритмов прекодирования в низкоорбитальных спутниковых системах	
<i>Коронов К. А., Пономарёв Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М.</i>	184
Интеллектуальная система управления многоспутниковой орбитальной группировкой	
<i>Мягих Д. А., Пономарёв Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М.</i>	187
Радиофотонные технологии в космических аппаратах	
<i>Николаев А. В., Солодков И. Н., Сазанов Д. А., Ходак И. С.</i>	191
Программный симулятор нисходящего канала Ku-диапазона системы спутниковой связи Starlink	
<i>Новожилов Д. В., Пономарёв Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М.</i>	194
Современные алгоритмы обработки телеметрических данных малых космических аппаратов	
<i>Новожилов Д. В., Пономарёв Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М.</i>	197
Телеметрия и управление данными на малых космических аппаратах	
<i>Новосельцев Д. А.</i>	200
Технические решения обеспечения положения и маневров бюджетных средств спутниковой связи на платформах сверхмалых КА	
<i>Обертюк М. И., Назарин В. К., Сидякин А. А.</i>	203
Анализ существующих спутниковых модемов. Направления развития отечественного оборудования	
<i>Сайбараков А. М., Пономарёв Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М.</i>	207
Технология SDR в низкоорбитальных спутниковых системах	

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА. ФОТОНИКА

<i>Ануарова Л. Т., Евтушенко С. С., Холодняк Д. В.</i>	211
Новый параметр качества пассивных цепей с отрицательным значением группового времени запаздывания	
<i>Бойчук М. И.</i>	214
Разработка термокомпенсированного кварцевого генератора в металлокерамическом корпусе для поверхностного монтажа	
<i>Веремеев И. В., Веремеева А. С.</i>	217
Влияние параметров металлизации электродов на температурную стабильность STW-резонаторов	
<i>Ворожцов А. Л.</i>	219
Измерение коэффициента шума интегральной схемы маломощного усилителя на пластине в СВЧ диапазоне	
<i>Воронцов А. М., Пономарев Д. Б., Лутченко С. С.</i>	222
Моделирование миниатюрных планарных трансформаторов для преобразователей питания	
<i>Давлеткильдеев Н. А., Никифорова А. О., Кривальцевич С. В.</i>	224
Сравнительный анализ нелинейных искажений аналоговых ВЧ-, УВЧ-сигналов в радиофотонной линии с прямой модуляцией, построенной на базе лазерных диодов различного типа	
<i>Дробот П. Н., Солдатов А. И.</i>	227
Кремниевый осцилляторный датчик температуры: сравнительный анализ и преимущества	
<i>Егошин Ю. И., Борейко Д. А., Тимошенко Т. С.</i>	230
Малогабаритные гибридные СВЧ фильтры	
<i>Ермоленко С. В.</i>	233
Проблемы миниатюризации кварцевых резонаторов-термостатов	
<i>Забегайло И. В., Яковлев А. Н.</i>	236
Расширение диапазона перестройки полосовых LC-фильтров	
<i>Казаков В. И., Китаев В. В.</i>	239
Многоканальная система контроля физических и технологических процессов на базе дифракционного спектрометра с оптимизированной топологией решетки	
<i>Карагусов В. И., Доберштейн С. А., Веремеев И. В.</i>	242
Генератор на частоту 1000 МГц с двухпортовым STW-резонатором	
<i>Кобылянский Н. В., Доберштейн С. А., Хоменко И. В.</i>	244
Маломощный генератор на частоту 1000 МГц с однопортовым резонатором на STW	
<i>Корж И. А., Косарев Б. А., Туймитова М. Н.</i>	246
Способ улучшения термостабильности сверхзаклопосных фильтров на ПАВ	
<i>Кропачев Д. Ю., Козлов А. Г., Лобов Д. Г., Шкаев А. Г.</i>	249
Измерения температуры расплава металлов инфракрасным способом	
<i>Лойко В. А., Даниленко Д. О.</i>	251
Экспериментальное исследование влияния способа монтажа ПАВ-резонатора на чувствительность к внешним вибрационным воздействиям	
<i>Молодкин А. А., Умылин В. Е., Абдурагимов Б. А.</i>	254
Монокристаллы отечественного производства для применения в современных акустоэлектронных устройствах	
<i>Поляков В. В.</i>	257
Транзисторный СВЧ автогенератор на копланарной структуре с двухсторонней металлизацией	

<i>Терехин В. В.</i>	259
Исследование СВЧ-усилителей малой и средней мощности с использованием платформы СВЧ КИТ	
<i>Тюменцев А. И., Тюменцева А. А.</i>	261
Узкополосный фильтр с конверторами сопротивления	
<i>Тюменцева А. А.</i>	264
Емкостно-нагруженный объемный резонатор с нулем передаточной функции	
<i>Шакин О. В., Кулак Г. В., Ропот П. И., Белый В. Н., Казаков В. И.</i>	266
Широкополосная дифракция света на объемных акустических волнах в кристаллах ниобата лития	

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭКБ И РЭА

<i>Бадамшин А. М., В. С. Ковивчак</i>	269
Влияние воздействия мощного ионного пучка на структурно-фазовый состав и свойства безвольфрамового твердого сплава	
<i>Баландин Д.А.</i>	273
Современная электронная компонентная база для СВЧ-электроники производства компании ООО «ИПК «ЭЛЕКТРОН-МАШ»	
<i>Баландин Д. А., Брынцев И. В., Евлампьев А. Ю.</i>	275
Статический СВЧ-делитель частоты миллиметрового диапазона длин волн	
<i>Богословцева А. Л., Шевченко О. Н., Гейдт П. В.</i>	277
Изучение акустических и оптических свойств пленок нитрида алюминия	
<i>Васильева Л. А., Труньков В. А.</i>	279
Установки для контроля электрических параметров кварцевых резонаторов	
<i>Гейдт П. В., Богословцева А. Л.</i>	282
Характеризация напряжений и дефектов в плёнках нитрида алюминия с применением рентгеновских методов и инфракрасной спектроскопии	
<i>Губарева Е. В., Пятанова П. А.</i>	284
Сорбционное извлечение ионов хрома (III) из сточных вод гальванических производств	
<i>Жданов Э. Р., Крюков А. В., Волков А. В., Харина О. С.</i>	286
Обзор применения высокотемпературостойких радиопрозрачных композитных материалов для защиты и выравнивания амплитудно-частотных характеристик СВЧ-приборов на летательном аппарате	
<i>Жилин Н. М., Улаева Т. Н., Чириков Н. А., Щекатунова В. Н., Кузнецов А. Н.</i>	288
Анализ электрических параметров ОАВ-резонатора в условиях воздействия иммобилизованного слоя	
<i>Кеда И. С., Доценко О. А.</i>	290
Электрофизические характеристики акриловых композитов на основе многостенных углеродных нанотрубок	
<i>Ковивчак В. С., Витершпан А.</i>	292
Нагрев поверхностного слоя подложки при магнетронном осаждении тонких пленок	
<i>Колomoец С. С.</i>	294
Исследование электрического сопротивления токопроводящего клея в процессе старения	
<i>Корж И. А.</i>	297
Исследование тонкопленочных резисторов с низким поверхностным сопротивлением на основе многослойных пленок Al/Ni, Al/Ti	

Корж И. А.....	300
Конструкции энергетических воспламенителей с защитой от электростатического электричества	
Корж И. А., Вареник В. В., Зонова Ю. С.	303
Определение времени срабатывания пиротехнического энергетического воспламенителя от параметров резистивного мостика	
Корж И. А., Вареник В. В., Зонова Ю. С., Чириков Н. А.	306
Исследование тепловых характеристик пиротехнического энергетического воспламенителя от его электрических и конструктивных параметров	
Корж И. А., Куклев А. Ю.	310
Определение эффективной высоты выброса частиц материала при иницировании резистивного мостика энергетического воспламенителя	
Корж И. А., Маркова Д. Н.	312
Исследование теплопроводности окисных пленок тантала, меди и никеля, используемых для изготовления энергетических воспламенителей	
Куклев А. Ю., Баранова Л. В., Струнин В. И., Чириков Н. А.	315
Влияние типа магнетронного разряда на оптические характеристики тонких пленок нитрида кремния	
Куклев А. Ю., Баранова Л. В., Струнин В. И., Чириков Н. А.	317
Исследование внутренних механических напряжений и показателя преломления в тонких пленках нитрида алюминия, полученных методом магнетронного напыления	
Маркова Е. И., Яворская М. А.	320
Определение степени расширения полиуретана в процессе полимеризации	
Немчанов К. В., Баймурзин Ч. М., Попков Д. А., Батырев И. А.	323
Разработка автоматизированных стендов проверки электрических параметров микросхем	
Немчанов К. В., Попков Д. А., Адамянц Е. С., Батырев И. А.	326
Автоматизированная система для настройки кварцевых резонаторов	
Пятанова П. А., Ложникова Т. В.	329
Химическое травление пластин катангасита	
Салихов И. А., Перебатов В. Н., Эрман А. П.	331
Опыт использования теплоотводящих слоёв многослойной печатной платы	
Уразбеков А. Е., Троян П. Е., Сахаров Ю. В.	332
Применение островковых пленок алюминия для улучшения воспроизводимости параметров мемристора	
Чуклин В. А., Воронкова А. И., Аглиулина Д. А.	334
Исследование свойств радиопрозрачности конструктивов, полученных методом аддитивных технологий	

ПЛЕНАРНАЯ ЧАСТЬ

PLENARY PART

А. В. Давыдович, В. Я. Винс, В. П. Михайлов

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ЕДИНАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА НА БАЗЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДЕЛОВ АО «ОНИИП»

Аннотация. Представлены результаты работ, выполненных в АО «ОНИИП» в целях создания перспективной единой системы связи Арктического региона.

Ключевые слова: Арктический регион, Северный морской путь, система связи.

Для цитирования: Давыдович А. В., Винс В. Я., Михайлов В. П. Единая система связи Арктического региона на базе научно-технических заделов АО «ОНИИП» // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 12–15.

A. V. Davydovitch, V. Y. Vins, V. P. Mikhaylov

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

UNIFIED COMMUNICATION SYSTEM OF THE ARCTIC REGION BASED ON SCIENTIFIC AND TECHNICAL RESOURCES OF ONIIP JSC

Abstract. The results of the work carried out at ONIIP JSC in order to create a promising Unified communication system for the Arctic region are presented.

Keywords: Arctic region, Northern Sea Route, communication system.

For citation: Davydovitch A. V., Vins V. Y., Mikhaylov V. P. Unified communication system of the Arctic region based on scientific and technical resources of ONIIP JSC // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 12–15.

Омский НИИ приборостроения является одним из организаторов Международной научно-практической конференции «Радиотехника, электроника и связь (РЭиС)». На пленарных заседаниях конференции традиционно звучат доклады, обобщающие результаты работы предприятия за последние годы. На «РЭиС-2025» представляется доклад, отражающий новые возможности предприятия, которые могут быть реализованы при создании перспективной телекоммуникационной системы, эксплуатация которой в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) должна способствовать развитию телекоммуникационной инфраструктуры данного региона. Предыдущий доклад на эту тему делался на конференции РЭиС-2017. Тематика цифровой радиосвязи в исследованиях наших ученых и разработках предприятия получила за эти годы определенное развитие, что и определило необходимость включения данного доклада в программу конференции в этом году.

В Основах государственной политики в Арктике, Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года и ряде других документов, определяющих план действий по реализации национальных интересов РФ в Арктике, большое внимание уделено комплексному развитию территорий Арктической зоны Российской Федерации, в том числе созданию на этой территории современной телекоммуникационной инфраструктуры.

Для наиболее полного удовлетворения потребностей абонентов Арктического региона в получении услуг связи, по мнению авторов этого доклада, необходимо применить комплексный подход и перейти к построению единой сети связи, увязав в неё все ведомственные и государственные сети всех видов связи, конечно же учитывая при этом права доступа к информации. Реализация единой сети связи требует создания единого оператора связи Арктического региона.

Нами предлагается строить единую сеть связи по территориально-зональному принципу, когда зональные сети отдельных территорий объединены между собой волоконно-оптическими, проводными и спутниковыми линиями связи, образующими единую опорную сеть. Пример построения такой сети приведен на рис. 1.

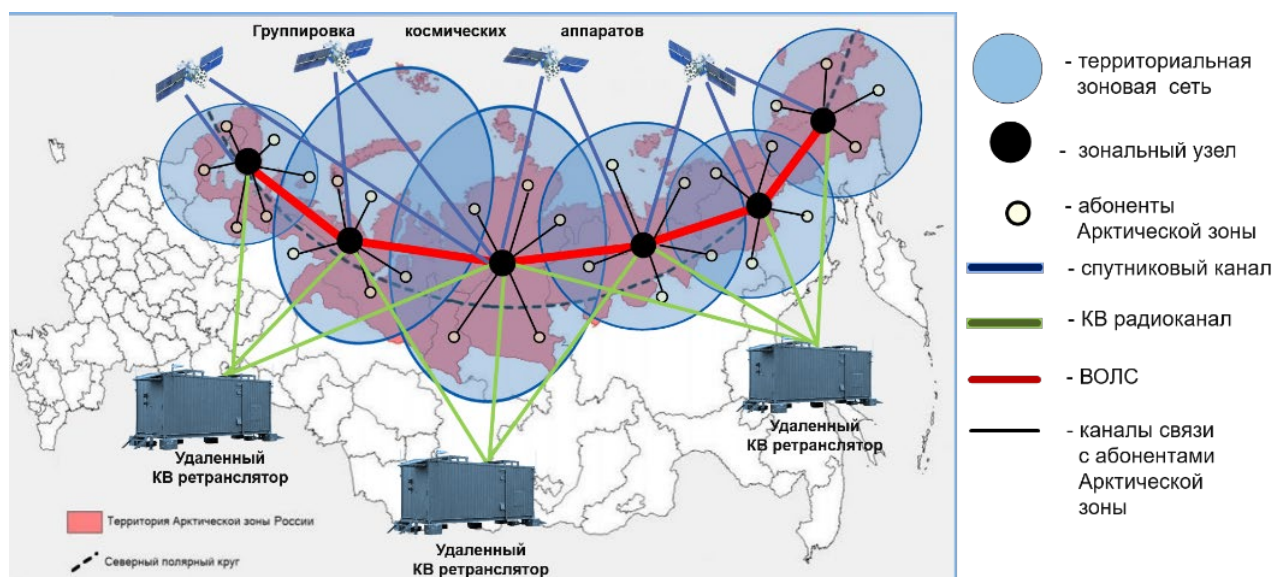


Рис. 1. Схема сети связи АЗРФ, построенной по территориально-зональному принципу

При этом считаем необходимым зарезервировать данную сеть коротковолновыми радиопередачами, организованными через удалённые ретрансляторы, размещенные на территории РФ с тем расчетом, чтобы точки отражения радиоволн от ионосферы располагались вне пределов Полярной зоны. Перспективность такого подхода неоднократно нашла свое отражение в публикациях сотрудников АО «ОНИИП». Этот резерв при необходимости сохранит в сети возможности голосового обмена, передачи команд управления, телеметрии, обмен файлами и сообщениями.

В качестве научно-технического задела для создания такой сети можно применить результаты предыдущих разработок узлов связи контейнерного типа, включая узлы связи, создававшиеся специально для развертывания в условиях Крайнего Севера.

На рис. 2 приведена фотография действующего макета узла связи для обеспечения удаленного управления атомной электростанцией малой мощности (АСММ). Имеются и другие решения по построению узлов связи, успешно работающие в АЗРФ.

В рамках разработки единой цифровой системы связи АЗРФ необходимо решить ряд основных задач:

- создание системы управления связью, включая автоматическую маршрутизацию с выбором оптимального свободного канала связи между зонами;
- определение процедуры регистрации абонентов в зоне, включая закрепление мобильных абонентов за территориальной зоной и их бесшовную передачу в соседние зоны в процессе движения;
- разработку объединённой системы адресации в сети с автоматическим переходом из объединённой системы в локальную (к примеру, транкинговой связи);
- создание центров обработки данных с региональной базой данных, с функциями защиты от вторжения в сеть на центральных зональных узлах связи.



«Проект «Шельф-УС»
(заказчик АО «НИКИЭТ», ГК «Росатом»)

Узел связи для обеспечения ОДУ АСММ с элементами искусственного интеллекта

Основные характеристики:

- Виды связи: спутниковая, коротковолновая, профессиональная цифровая стандарта TETRA;
- Основной канал связи – спутниковый двусторонний с пропускной способностью не менее 1 Мбит/с, резервный – КВ;
- Обеспечение обмена разнородной информацией (телеметрия, команды управления, цифровое аудио/видео для аудио/видеоконференций), обеспечивающей удаленное ОДУ АСММ;
- Передача информации с заданной приоритетностью.

Рис. 2. Фотография и характеристики действующего макета узла связи в контейнерном исполнении

Эти задачи должны быть выполнены под руководством единого оператора связи АЗРФ. При этом следует отметить, что если ранее АО «ОНИИП» рассматривалось исключительно как предприятие, занимающееся разработкой средств радиосвязи, то в настоящее время в портфеле наших заказов появились и технические средства связи и автоматизации для телекоммуникационных систем, построенных на основе волоконно-оптических и кабельных линий связи.

В традиционных направлениях нашей работы, в том числе в разработке средств радиосвязи в арктическом исполнении, можно выделить:

- приемные и передающие радиоцентры арктического исполнения в стационарном и модульном вариантах;
- комплексные мобильные и модульные радиоузлы;
- стационарные, мобильные и носимые КВ/УКВ радиостанции;
- высокоскоростные и помехозащищённые радиолинии;
- радиомодемы;
- цифровые многоканальные радиоприемные устройства;
- цифровые радиопередатчики КВ диапазона;
- приемные, передающие и приемопередающие АФС, усилители и высокочастотные коммутаторы.

Серийно выпускаемые приводные аэродромные радиостанции ПАР-10, предназначенные для обеспечения дальнего и ближнего привода в район аэродромов и посадки летательных аппаратов, оборудованных радиокомпасами, получили в последние годы

«новую жизнь» за счет проведенной глубокой модернизации и могут применяться для решения навигационных задач.

В относительно новом для нас направлении – разработка и производство систем спутниковой связи – созданы двухдиапазонные абонентские станции спутниковой связи С- и Ku-диапазонов, работающие в расширенном температурном диапазоне, а также абонентские терминалы, работающие в Р-диапазоне через низкоорбитальные спутники системы «Гонец». В настоящее время ведется освоение серийного производства абонентских станций спутниковой связи носимого, возимого и стационарного вариантов исполнения.

НИОКР, выполняемые предприятием, охватывают системы спутниковой, морской и наземной составляющих современных цифровых телекоммуникационных систем и могут стать основой для построения предлагаемой системы связи для АЗРФ.

Таким образом, применив комплексный подход и объединив в единую цифровую сеть все виды связи на территории Арктики, мы получим телекоммуникационную инфраструктуру, способную решать практически любые задачи по обеспечению связью, а в дальнейшем и по предоставлению инфокоммуникационных услуг всем абонентам региона. Технические средства и комплексы, разрабатываемые и серийно выпускаемые в АО «ОНИИП», могут быть использованы в качестве базовых элементов единой системы связи Арктического региона.

А. Н. Киченко

Москва, Российская Федерация

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОПОЛОГИИ СЕТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПЕРСПЕКТИВНОЙ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ

Для цитирования: Киченко А. Н. Формализация функционирования и определение топологии сети космических аппаратов перспективной низкоорбитальной спутниковой системы // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 16–17.

A. N. Kichenko

Moscow, Russian Federation

FORMALIZATION OF THE FUNCTIONING AND DETERMINATION OF THE TOPOLOGY OF THE SPACECRAFT NETWORK OF A PROMISING LOW-ORBIT SATELLITE SYSTEM

For citation: Kichenko A. N. Formalization of the functioning and determination of the topology of the spacecraft network of a promising low-orbit satellite system // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 16–17.

Формализованное описание процессов функционирования сети космических аппаратов (КА) с точки зрения решения задачи идентификации взаимодействующих объектов с целью определения вариантов построения системы технического диагностирования как отдельных аппаратов, так и всей сети в целом носит определяющий характер при планировании построения спутниковой группировки. Предлагается перспективная топология сети КА с учётом организации информационного обмена по видам передаваемой информации, также сформированы направления дальнейших исследований в рамках развития идеи создания низкоорбитальной спутниковой системы связи.

Оптимальным вариантом построения сети с точки зрения эффективного применения КА по назначению является реализация схемы полносвязного их взаимодействия. Однако большая избыточность сети однозначно приводит к снижению оперативности решения как целевых задач, так и задач, связанных с реконfigurацией (перестроением) сети в случае выхода из строя КА. Выходом из сложившейся ситуации является определение необходимого набора элементов сети (количество КА), а также связей между конкретными КА по видам информации. Эта задача может быть решена исходя из выбранного обоснованного способа управления.

В настоящее время известно три основных подхода к управлению сложными объектами: централизованное, децентрализованное и смешанное (сосредоточенно-распределённое).

Применительно к сети КА централизованное управление осуществляется из наземного терминала передачи, приема и обработки информации. При этом наземный пункт управления может осуществлять управление полётом и обмен данными по каналам связи с каждым бортом. При децентрализованном управлении каждый КА принимает

решение об управлении индивидуально на основе информации о целевой задаче и состоянии ближайших соседей. Обмен информацией с наземными пунктами управления (НПУ) происходит периодически по требованию оператора, либо согласно определённому алгоритму.

По результатам проведенного анализа способов управления можно сделать вывод о предпочтительности использования смешанного(сосредоточено-распределённого) управления сетью. На всех уровнях в условиях деструктивного воздействия внешних факторов на КА в процессе применения по назначению их радиоканалы будут самостоятельно принимать решения на основе информации о состоянии сети. Общий подход к управлению сетью КА с задействованием наземных пунктов управления определяет его централизованный аспект. С НПУ осуществляется общее управление всеми КА через определённые уровни.

Для определения сетевой топологии, как элемента фактор-множества, необходимо выполнить анализ известных схем построения сетей информационного обмена с целью конфигурации связей между КА в сети. Следует отметить, что выбор той или иной топологии влияет на возможности расширения сети и передачу информации. Различают следующие основные виды топологий: «шина», «кольцо», «звезда», «ячеистая топология» и «решетка».

Анализ приведённых топологий показал, что использование единственной конфигурации связи нецелесообразно, так как передаётся и одновременно обрабатывается различная информация.

Дальнейшие научные исследования в рамках формализации функционирования сети КА направлены на разработку алгоритма идентификации сетей КА с учетом формализации сети; системы поддержки и принятия решения о состоянии КА, секторов и всей сети; моделирование различных сценариев деструктивного воздействия на сеть КА; алгоритма оценивания надежности разработанной сети; алгоритма анализа воздействия на сеть внутренних и внешних факторов; стратегии управлению сетью КА (реконфигурирование) в случае выхода из строя КА; модели принятия решений при применении КА по назначению.

Использованием модели функционирования в системе поддержки и принятия решений в сети позволяет минимизировать значение функции и, как следствие, повысить эффективность решения задач в условиях деструктивных воздействий среды.

**М. С. Хайретдинов¹, В. В. Ковалевский¹, Р. А. Жостков²
Д. А. Преснов², В. В. Толочко³**

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
Новосибирск, Российская Федерация

²Институт физики Земли РАН им. О.Ю. ШМИДТА, Москва, Российская Федерация

³Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Российская Федерация

ФИЗИЧЕСКИЕ ФЕНОМЕНЫ В ЗАДАЧАХ ДАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Аннотация. Рассматриваются численное моделирование и результаты экспериментов по изучению распространения вибрационных волн от мощного стотонного вибратора ЦВ-100 на байкальском прогностическом полигоне на линейной трассе протяженностью 100 км. При этом охватываются смежные среды: земля – вода – атмосфера – лед с целью изучения особенностей распространения колебаний в них. В результате вибрационного зондирования выбранной трассы БРЗ изучены пространственно-частотно-временная и поляризованная структуры колебаний в смежных средах, особенности распространения волн.

Ключевые слова: вибрационное зондирование, Байкальская рифтовая зона, сейсмо-акусто-гидродинамические волны, особенности распространения.

Для цитирования: Хайретдинов М. С., Ковалевский В. В., Жостков Р. А., Преснов Д. А., Толочко В. В. Физические феномены в задачах дальнего распространения сейсмоакустических волн // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 18–20.

**M. S. Khairtdinov¹, V. V. Kovalevsky¹, R. A. Zhostkov²
D. A. Presnov², V. V. Tolochko³**

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

²O.Yu. Shmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russian Federation

³Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

PHYSICAL PHENOMENA IN PROBLEMS OF LONG-RANGE PROPAGATION OF SEISMOACOUSTIC WAVES

Abstract. This paper examines numerical modeling and experimental results for studying the propagation of vibration waves from a powerful 100-ton CV-100 vibrator at the Baikal Prognostic Test Site along a 100-km linear path. The study covers adjacent media: land-water-atmosphere-ice, with the aim of studying the propagation characteristics of vibrations in them.

As a result of vibration sounding of the selected BRZ path, the spatial-frequency-temporal and polarization structure of vibrations in adjacent media were studied, as well as the wave propagation characteristics.

Keywords: vibration sounding, Baikal Rift Zone, seismo-acoustic-hydrodynamic waves, propagation characteristics.

For citation: Khairtdinov M. S., Kovalevsky V. V., Zhostkov R. A., Presnov D. A., Tolochko V. V. Physical phenomena in problems of long-range propagation of seismoacoustic waves // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 18–20.

Рассматривается проблема вибрационного зондирования сложнопостроенных физических сред сейсмоакустическими колебаниями мощных сейсмических вибраторов

типа центробежного вибратора ЦВ-100 с амплитудой возмущающей силы 100 тс. Актуальность исследований по рассматриваемому направлению определяется решением ряда современных задач – геофизического мониторинга Арктической прибрежной зоны, изучением скоростного разреза Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), потребностями морской разведки на углеводороды на шельфах и др.

Выбор БРЗ в качестве объекта проведения экспериментальных работ по изучению закономерностей дальнего распространения геоакустических колебаний в смежных средах «земля-вода-атмосфера лед» определяется рядом достоинств БРЗ – прежде всего одновременной сопряженностью 4-х сред, достаточной геолого-геофизической изученностью примыкающей к озеру области – Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). В силу этого открываются возможности для проведения как численного моделирования распространения, так и проведения экспериментов.

Достоинством является базирование на берегу Байкала (пос. Бабушкин) мощного сейсмического вибратора ЦВ-100 с возмущающей силой 100 тс в диапазоне частот 6,25-10,5 Гц. Источник применяется для глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) района БРЗ. Третий немаловажный фактор связан с большой глубиной озера, равной 1642 м в самом глубоком месте. В дополнение к сказанному следует отметить хорошую транспортную доступность к объекту исследований.

В эксперименте средства излучения-регистрации и геометрия их расположения показаны на рис. 1. В качестве излучателя геоакустических колебаний применяется сейсмический вибратор ЦВ-100 с возмущающей силой 100 тс в диапазоне частот 6,25-10,5 Гц. Параллельная и одновременная регистрация производится в 7 пространственно разнесенных точках линейного профиля. В процессе распространения образуется комплекс геоакустических полей: основные сейсмические в земле и акустические в атмосфере волновые поля, излучаемые непосредственно источником, формирующиеся волновые поля как результат распространения основных полей: гидроакустические поля, возникающие как результат трансформации сейсмических полей на границе «дно-море», на границе «берег- море», а также на границе перехода «атмосфера-поверхность моря».

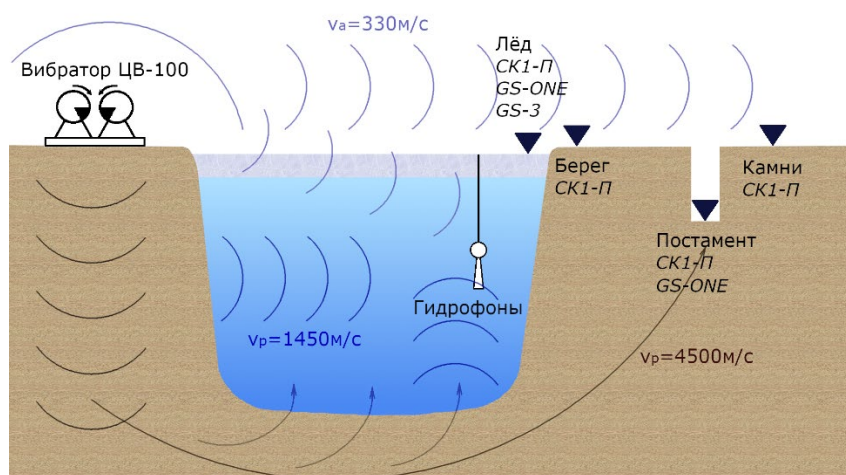


Рис. 1. Технические средства излучения-регистрации и геоакустические поля

Наконец, следует принимать во внимание поле, которое распространяется в ледовом покрытии озера Байкал. Таким образом, картина распределения волновых полей и их взаимодействия носит сложный характер. С учетом этого анализируются данные экспериментов и выполненного численного моделирования.

Получаемая в точках регистрации типичная структура волн представлена на рис. 2.

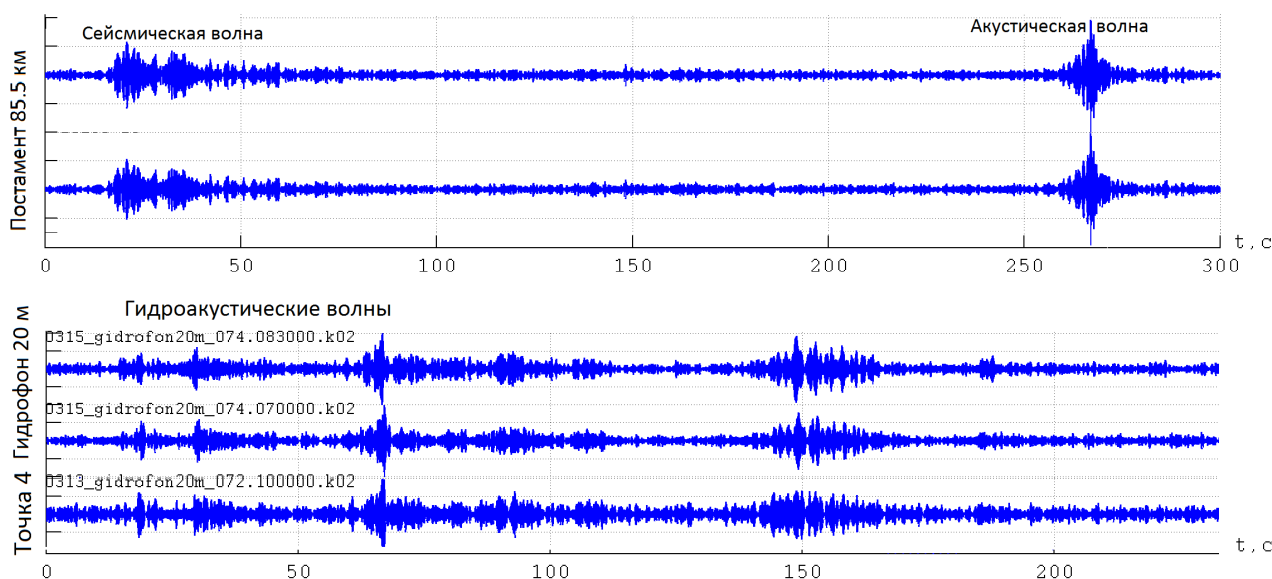


Рис. 2. Локализация типов волн во времени: первичные сейсмические волны на «постаменте» (удаление от источника 85,5 км) со временем вступления 16,9 с, акустическая волна – 266 с, первичная гидроакустическая волна (удаление от источника 84 км, время вступления 15,15 с)

Распространение волн в Земле отражено виде первичной сейсмической волны со временем первого вступления 16,9 с, в атмосфере – акустической волны со временем вступления 262 с (верхняя часть рисунка). Картина волнового поля в воде с гидроакустическими волнами (нижняя часть рисунка) существенно сложнее вследствие выраженности эффектов переотражений на границах «дно-лед», а также на границах разнотности воды по глубине озера Байкал. Принципиальный вывод из приведенных сейсмограмм состоит в том, что в воде присутствуют первичные гидроакустические волны на временах вступлений скоростных продольных сейсмических волн в земле. Им в данном случае соответствуют скорости распространения около 5,06 км/с. Дополнительно регистрируется прямая гидроакустическая волна со скоростью распространения волны в воде и масса отраженных волн (нижняя часть рис. 2).

Результатами численного моделирования являются рассчитанные сейсмограммы, полученные в диапазоне дальностей 0-90 км с шагом 5 км. Другой важный численный результат связан с получением картин волновых полей, отражающих динамику их распространения по времени.

Полученные здесь результаты привязаны к схеме проведения описанных выше экспериментов.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0004.

СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ И ЗОНДИРОВАНИЯ. РАДИОЛИНИИ И РАДИОМОДЕМЫ

WIRELESS COMMUNICATION AND SENSING SYSTEMS AND COMPLEXES. RADIO LINES AND RADIO MODEMS

М. М. Анишин¹, Д. Е. Зачатейский^{1,2}, В.-А. В. Любчик^{1,2}, А. А. Соловьев³

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

³Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ КВ-РАДИОСЕТЬЮ

Аннотация. Рассматривается решение задачи планирования работы коротковолновой радиосети, обеспечивающей доставку сообщений с использованием сети радиоцентров. Показаны возможности программного обеспечения, предоставляющего компьютерную поддержку принятия решений по организации радиосвязи с подвижными объектами, точное местоположение которых во время сеанса связи может быть неизвестно.

Ключевые слова: короткие волны, радиосеть, поддержка принятия решений.

Для цитирования: Анишин М. М., Зачатейский Д. Е., Любчик В.-А. В., Соловьев А. А. Поддержка принятия решений при управлении КВ-радиосетью // Радиотехника электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 21–24.

М. М. Anishin¹, D. E. Zachateiskii^{1,2}, V-A. V. Liubchik^{1,2}, A. A. Solovev³

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

³Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

DECISION SUPPORT FOR HF RADIO NETWORK MANAGEMENT

Abstract. The paper considers the solution to the problem of planning the operation of a shortwave radio network, ensuring the delivery of messages using a network of radio centers. The authors show the capabilities of software that provides computer support for decision making on the organization of radio communications with mobile objects whose exact location during the communication session may be unknown.

Keywords: Shortwaves, radio network, decision support.

For citation: Anishin M. M., Zachateiskii D. E., Liubchik V-A. V. Solovev A. A. Decision support for HF radio network management // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 21–24.

Примем, что распространение радиоволн коротковолнового диапазона на большие расстояния обеспечивает возможность радиосвязи с некоторым подвижным объектом

(корреспондентом) с нескольких пространственно разнесенных радиоцентров. При управлении конвергентной радиосетью, объединяющей проводные (оптоволоконные) линии связи, радиорелейные или проводные линии привязки приемного и передающего радиоцентров и радиолинии, должностными лицами, обеспечивающими управление сетью, должна решаться задача формирования тракта связи между, как правило, стационарными и подвижным объектами – корреспондентом радиосети. Границы зон обслуживания каждого из радиоцентров по причине изменчивости параметров среды распространения радиоволн – ионосферы Земли, постоянно меняются и лучшие условия радиосвязи с корреспондентом в различных условиях могут обеспечиваться с разных радиоцентров. При организации связи может решаться задача по организации радиообмена как с корреспондентом, местоположение которого известно, так и с группой корреспондентов, находящихся в некотором районе. Экспериментальная оценка качества каналов возможна, но требует как некоторого времени на организацию и проведение зондирования, так и организации сбора данных со всех радиоцентров. Формирование тракта между корреспондентами радиосети может быть реализовано и в соответствии с результатами прогнозирования условий работы расчетным методами, что может быть сделано с меньшими временными затратами и организационными сложностями.

На решение задачи влияет множество природных и технических факторов, к которым можно отнести сезонные, суточные, географические и др. изменения среды распространения, доступные мощности радиопередающих устройств, работающих на каждом из радиоцентров, характеристики антенно-фидерных устройств, уровень, временное и частотное распределение радишумов на приемных радиоцентрах и пр. Большой объем входных данных определил необходимость интеграции в представляемый программный комплекс «Радиосеть» (ПК «Радиосеть») разработанных ранее программ для расчета тракторных и энергетических характеристик КВ радиолиний типа «точка-точка» и СУБД. Автоматизированная обработка результатов расчета, с предоставлением рекомендаций по использованию: радиоцентра, с которого во время сеанса связи, наиболее целесообразно вести радиообмен с корреспондентом, антенн приемного и передающего радиоцентров, обеспечивающих связь с нужным районом и параметров радиоаппаратуры, обеспечивающих радиосвязь с нужным качеством, позволяет использовать разработанный программный комплекс в качестве системы поддержки принятия решений должностного лица, управляющего работой радиосети.

Расчёт тракторных и энергетических характеристик в ПК «Радиосеть» обеспечивается комбинацией нескольких моделей: модели описания радиолиний коротковолновой радиосвязи, рекомендованной Международным союзом электросвязи (Рекомендация ITU-R P.533) и моделей, заложенных в основу пакета расчетов радиотрасс декаметрового диапазона ПО «Трасса» (ионосферы, поглощения радиоволн, радишумов и др.). Такое сочетание моделей и опирающихся на них алгоритмов прогнозирования обеспечивает приемлемую для практического применения результатов точность расчета и время получения его результатов. Блок схема алгоритма программы представлена на рис. 1.

В ПО «Радиосеть» ионосфера, как среда распространения коротких радиоволн, описывается Международной справочной моделью ионосферы IRI-2020. Расчет максимально применимых и оптимальных частот радиолиний выполняется по методикам ITU-R, в которых сочетаются подходы к применению аналитической зависимости максимально применимой частоты от критической частоты слоя, гирочастоты и протяженности трассы, и способ геометрическое построение траекторий исходя из высоты отражения луча, что обеспечивает высокую скорость расчетов, требуемую при решении комбинаторных задач.

Точностные характеристики результатов расчета при определении отношения сигнал/шум определяются применением модели ионосферы IRI-2020, учетом потерь во

всех слоях ионосферы, применения авторских методов расчета энергетических характеристик радиоволны: ионосферного поглощения, пространственного ослабления, потери при отражении от Земли и поляризационных потерь в магнитоактивной пространственно-неоднородной ионосферной плазме. Диаграммы направленности антенн радиоцентров могут описываться как вводом соответствующих данных оператором, так и с использованием встроенной библиотеки программных модулей, выполняющих моделирование их характеристик.

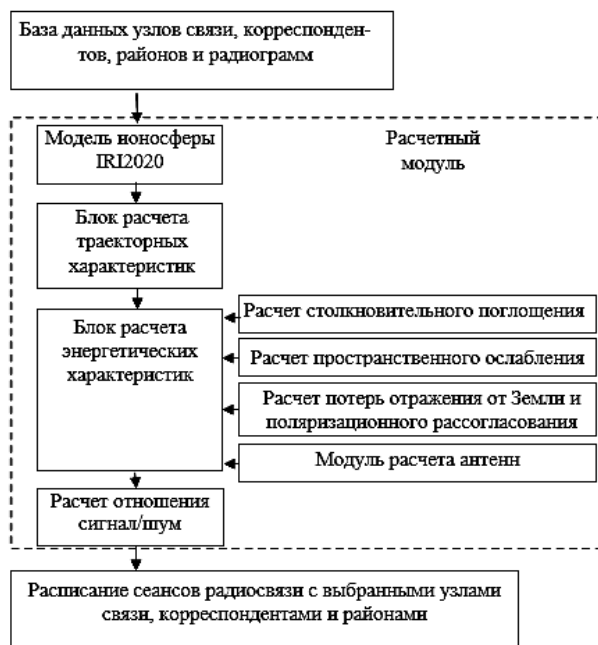


Рис. 1. Блок-схема ПО «Радиосеть»

ПК «Радиосеть» обеспечивает возможность оперативного решения задач прогнозирования условия работы радиосети, что может быть использовано для дистанционного управления работой радиоцентров с единого пункта управления.

Тестовые расчеты проведены в АО «ОНИИП» для модели радиосети, состоящей из четырех узлов связи в городах Москва, Екатеринбург, Омск, Иркутск и двух корреспондентов, находящихся в пределах района, обозначенного на рис. 2 прямоугольником.

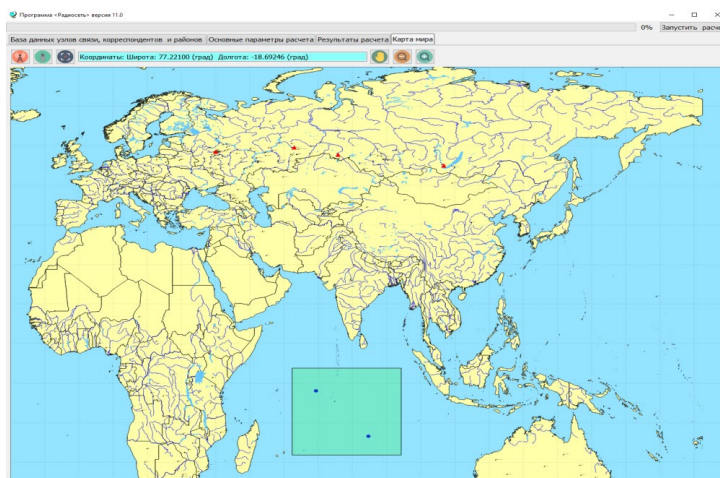


Рис. 2. Отображение объектов прогнозируемой радиосети на карте мира в ПК «Радиосеть»

Рассматривалась следующая конфигурация радиосети: мощность передатчиков береговых узлов связи составляет 5 кВт, используемая антенна логопериодическая, ориентированная в южном направлении. Мощность передатчиков корреспондентов 1кВт, используются штыревые антенны высотой 8 м. Проверка проведена при разных уровнях солнечной активности, определяемой значениями числа Вольфа 50, 100 и 150. Время сеансов связи задавалось равным: 00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 часам UTC.

Полученные в результате моделирования расчетные значения отношения сигнал/шум, позволяют ранжировать рассмотренные радионаправления по типу канала на основной, дублирующий и резервный, а также получить значения оптимальных рабочих частот для осуществления связи с подвижными объектами, находящимися в указанном районе.

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

К. А. Батенков

РТУ МИРЭА, Москва, Российская Федерация

АНАЛИЗ КЛЮЧЕВЫХ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ

Аннотация. Рассматриваются основные параметры качества обслуживания (QoS) в современных телекоммуникационных сетях: задержка передачи, вариация задержки (джиттер). Особое внимание уделено проблеме отсутствия четких стандартов измерения этих параметров, что приводит к неоднозначности их интерпретации. Анализируются методы вычисления задержки и ее вариации, а также их влияние на пользовательский опыт. Рассмотрены способы компенсации негативных эффектов, такие как буферизация данных.

Ключевые слова: качество обслуживания, задержка передачи, джиттер, IP-сети, пользовательский опыт.

Для цитирования: Батенков К. А. Анализ ключевых временных параметров качества обслуживания в телекоммуникационных сетях // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 25–26.

К. А. Batenkov

RTU MIREA, Moscow, Russian Federation

ANALYSIS OF KEY TIME PARAMETERS OF SERVICE QUALITY IN TELECOMMUNICATION NETWORKS

Abstract. The article discusses the main parameters of quality of service (QoS) in modern telecommunication networks: transmission delay, delay variation (jitter). Particular attention is paid to the problem of the lack of clear standards for measuring these parameters, which leads to ambiguity in their interpretation. The methods of calculating the delay and its variations are analyzed, as well as their impact on the user experience. Ways to compensate for negative effects, such as data buffering, are considered.

Keywords: quality of service, transmission delay, jitter, IP networks, user experience.

For citation: Batenkov K. A. Analysis of key time parameters of service quality in telecommunication networks // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 25–26.

Качество обслуживания (QoS) в современных телекоммуникационных сетях является критически важным фактором, определяющим удовлетворенность пользователей. Основными параметрами QoS считаются задержка передачи, вариация задержки (джиттер) и потери данных. Однако, как отмечается в рекомендации G.1010, четкие определения и методы измерения этих параметров отсутствуют, что создает проблемы при оценке качества услуг.

Задержка передачи может измеряться различными способами в зависимости от типа приложения: как время между запросом и ответом или как задержка между отправкой и получением данных. Из-за стохастической природы пакетных сетей задержку часто оценивают через среднее значение, но это не всегда отражает реальное качество обслуживания. Вариация задержки также вычисляется по-разному: через амплитуду, размах или среднеквадратическое отклонение, что усложняет сравнение результатов.

Цель данной работы – систематизировать подходы к оценке QoS, выявить ключевые проблемы измерений и предложить возможные пути их решения. Особое внимание уделено влиянию задержки и джиттера на пользовательское восприятие качества услуг.

К основным параметрам качества обслуживания относят задержку передачи, вариацию задержки и потери информации (ошибки). Кроме того, при одновременной передаче аудио и видео сигналов рассматривают также синхронность потоков. Отметим, что, к сожалению, четких определений параметров качества в рекомендации G.1010 не приводится – существуют лишь общие их описания с указанием границ. В результате введенные границы, в отличие от границ качества функционирования сети, носят скорее даже не рекомендательный характер, а обзорный. Кроме того, появляется значительная вольность в вычислении показателей качества обслуживания, что особенно ярко проявляется при расчете джиттера.

Задержка передачи τ (наиболее часто используется так называемая односторонняя задержка) может, в зависимости от типа рассматриваемого приложения, быть представлена в различных формах, например, временем между моментом запроса пользователя информации и моментом получения соответствующего ответа, или временем между моментами отправки речевого кадра источником и приемом этого кадра получателем.

Вследствие стохастической природы процесса передачи информации посредством пакетной сети обычно задержку передачи рассматривают на уровне первых моментов распределения, то есть качество обслуживания характеризуют *средней задержкой передачи*.

Задержка передачи оказывает непосредственное влияние на удовлетворенность пользователя предоставляемой услугой и включает в себя задержки в терминалах, сети или других устройствах, находящихся на пути следования потоков данных. Отметим также, что с точки зрения пользовательского восприятия задержка передачи учитывает также и ряд вспомогательных сетевых параметров (например, пропускную способность), в том числе и параметров качества функционирования сети.

Вариация задержки передачи ν вычисляется на основе статистических данных о задержке. Будем предполагать, что рассматриваемая статистика вариации задержки соответствует *амплитуде вариации задержки передачи*. Отметим, что иногда также рассматривается и размах амплитуды или даже среднеквадратическое отклонение. Кроме того, по аналогии с параметрами качества функционирования сети, могут использоваться и различные квантили распределения задержки.

Вариация задержки передачи обычно рассматривается как показатель качества обслуживания вследствие значительного влияния на параметры потоков транспортного уровня неопределенности длительностей передачи отдельных порций данных нижележащих уровней (кадров, пакетов, ячеек). Тем не менее, услуги (приложения), чувствительные к вариации задержки, как правило, предпринимают определенные усилия для устранения, или, по крайней мере, для существенного снижения негативных последствий стохастичности времен прибытия данных путем использования буфера, снижающего вариацию задержки на уровне пользователя (приложений).

Проведенный анализ показал, что задержка передачи и ее вариация являются ключевыми параметрами, определяющими качество обслуживания в телекоммуникационных сетях. Однако отсутствие единых стандартов измерения приводит к значительным расхождениям в оценках QoS, что затрудняет сравнение услуг разных провайдеров.

Для улучшения точности измерений необходимо разработать унифицированные методы расчета задержки и джиттера, учитывающие специфику различных приложений. Кроме того, важно учитывать компенсационные механизмы, такие как буферизация, которые могут значительно снизить негативное влияние вариации задержки на пользовательский опыт.

Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на разработку адаптивных алгоритмов управления QoS, способных динамически подстраиваться под изменения сетевых условий и требования пользователей. Это позволит не только повысить качество услуг, но и оптимизировать использование сетевых ресурсов.

А. Д. Бондарук¹, Д. Ю. Пономарёв¹, А. В. Фарафонов², М. М. Молоков¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация

²Военный институт (научно-исследовательский) ВКА имени А.Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Российская Федерация

ВОЗДУШНЫЙ ЭШЕЛОН ОРБИТАЛЬНО-НАЗЕМНЫХ СПУТНИКОВЫХ СЕТЕЙ: ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация. Рассмотрены архитектура, технологии и преимущества, связанные с интеграцией воздушного эшелона в многоуровневые спутниковые сети. Показано, что использование высотных платформ (High-Altitude Platform Stations, HAPS), таких как дирижабли, аэростаты и беспилотные летательные аппараты, позволяет сократить задержки, повысить пропускную способность и снизить энергозатраты по сравнению с низкоорбитальными космическими аппаратами (LEO), сохраняя при этом широкое покрытие.

Ключевые слова: воздушный эшелон, HAPS, спутниковые сети, орбитально-наземные сети, стратосферные платформы, 6G, гибридные сети, телекоммуникации.

Для цитирования: Бондарук А. Д., Пономарев Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М. Воздушный эшелон орбитально-наземных спутниковых сетей: технологии и перспективы // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 27–28.

A. D. Bondaruk¹, D. U. Ponomarev¹, A. V. Farafonov², M. M. Molokov¹

¹ERA Military Innovation Technopolis, Anapa, Russian Federation

²Military (Scientific-Research) Institute of Mozhaisky Military Aerospace Academy
Saint-Petersburg, Russian Federation

AIR ESHELON OF ORBITAL-TERRESTRIAL SATELLITE NETWORKS: TECHNOLOGIES AND PROSPECTS

Abstract. This paper discusses the architecture, technologies, and benefits associated with integrating airborne platforms into multi-tiered satellite networks. It shows that using high-altitude platforms (HAPS), such as airships, balloons, and unmanned aerial vehicles (UAVs), can reduce delays, increase bandwidth, and lower energy consumption compared to low-Earth orbit (LEO) satellites while maintaining wide coverage.

Keywords: air echelon, HAPS, satellite networks, orbital-terrestrial networks, stratospheric platforms, 6G, hybrid networks, telecommunications.

For citation: Bondaruk A. D., Ponomarev D. U., Farafonov A. V., Molokov M. M. Air echelon of orbital-terrestrial satellite networks: technologies and prospects // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 27–28.

Введение

Развитие спутниковых телекоммуникаций в последние десятилетия привело к созданию многоуровневых архитектур, включающих геостационарные, среднеорбитальные и низкоорбитальные космические аппараты. Однако даже такие системы сталкиваются с проблемами высоких задержек, высокой стоимости развёртывания и сложности обслуживания.

В то же время развитие технологий беспилотной авиации и материаловедения позволило вернуться к идее воздушного эшелона – сети летательных аппаратов, функционирующих на высотах 18-35 км в стратосфере. Такие платформы могут выполнять функции ретрансляторов, шлюзов или даже автономных узлов связи, обеспечивая мост между наземной инфраструктурой и спутниковой сетью.

Технологии воздушного эшелона

Воздушный эшелон, функционирующий в стратосфере на высотах 18-35 км, представляет собой сложную интегрированную систему, объединяющую достижения аэродинамики, энергетики, телекоммуникаций, робототехники и искусственного интеллекта. Современные и перспективные технологии воздушного эшелона можно классифицировать по следующим ключевым направлениям:

Основные уровни орбитально-наземных спутниковых сетей:

- Наземный уровень: базовые станции 5G/6G, пользовательские терминалы, оптоволоконные узлы.
- Воздушный эшелон: аэростаты, беспилотные летательные аппараты, дирижабли, ретрансляторы, (18-25 км).
- Орбитальный уровень: геостационарные, среднеорбитальные и низкоорбитальные космические аппараты, межспутниковые линии связи (300-36000 км).

Роль воздушного эшелона:

- Ретрансляция сигналов между наземными узлами и космическими аппаратами.
- Обеспечение "последней мили" связи в отдалённых районах.
- Снижение нагрузки на спутниковые каналы за счёт локальной обработки трафика.
- Поддержка динамической маршрутизации и переключения между космическими аппаратами.

Перспективы развития

Интеграция воздушного эшелона в многоуровневые орбитально-наземные спутниковые сети открывает широкий спектр перспектив, выходящих за рамки традиционных телекоммуникаций. В ближайшие 10-15 лет ожидается трансформация систем воздушного эшелона из экспериментальных платформ в ключевой элемент глобальной цифровой инфраструктуры.

Заключение

Воздушный эшелон представляет собой перспективное технологическое решение при построении орбитально-наземных спутниковых сетей, объединяя преимущества наземных и спутниковых систем передачи информации. Его разработка и внедрение позволяет повысить эффективность, отказоустойчивость и доступность глобальных телекоммуникаций. Несмотря на существующие технические проблемы и ограничения, развитие технологий воздушного эшелона открывает новые возможности для построения устойчивых, масштабируемых и энергоэффективных сетей связи.

С. А. Борисевич

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ ВЫСОКОЙ ДОСТУПНОСТИ

Аннотация. Рассматриваются ключевые инженерные принципы проектирования отказоустойчивых вычислительных кластеров, обеспечивающих высокую доступность сервисов в критически важных инфраструктурах. Анализируются ключевые аппаратные и программные решения: резервирование узлов, дублирование сетевых каналов, источников питания, использование отказоустойчивых систем хранения, а также использование балансировщиков нагрузки для распределения вычислительных и сетевых ресурсов, миграцию виртуальных машин в реальном времени и репликацию данных. Предложенные подходы позволяют минимизировать время простоя сервисов, повысить отказоустойчивость систем и приблизиться к целевым показателям уровня доступности SLA в 99,99% и выше.

Ключевые слова: отказоустойчивость, высокая доступность, аппаратное резервирование, балансировка нагрузки, среда виртуализации, репликация данных.

Для цитирования: Борисевич С. А. Принципы проектирования отказоустойчивых вычислительных кластеров высокой доступности // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 29–31.

S. A. Borisevich

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

PRINCIPLES OF DESIGNING HIGHLY AVAILABLE FAULT-TOLERANT COMPUTING CLUSTERS

Abstract. This paper discusses the key engineering principles of designing fault-tolerant computing clusters that ensure high availability of services in mission-critical infrastructures. The analysis covers essential hardware and software solutions, including node redundancy, duplication of network channels and power sources, deployment of fault-tolerant storage systems, as well as the use of load balancers for distributing computing and network resources, live migration of virtual machines, and data replication. The proposed approaches minimize service downtime, improve system resilience, and achieve SLA target availability levels of 99,99% and higher.

Keywords: fault tolerance, high availability, hardware redundancy, load balancing, virtualization environment, data replication.

For citation: Borisevich S. A. Principles of designing highly available fault-tolerant computing clusters // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 29–31.

В условиях растущих требований к непрерывной работе информационных сервисов задача обеспечения высокой доступности выходит на первый план. Вычислительные кластеры позволяют распределять нагрузку между узлами, повышая эффективность и отказоустойчивость. Основой их проектирования является исключение единых точек отказа на всех уровнях – от питания и сетевой инфраструктуры до систем хранения данных и приложений.

Аппаратное резервирование

Базовый принцип построения отказоустойчивого кластера заключается в многоуровневом аппаратном резервировании.

- Кластер. В большинстве распределённых систем использующие алгоритмы консенсуса для создания отказоустойчивого кластера требуется минимум 3 узла, чтобы обеспечить кворум (большинство голосов) для согласованности данных при сбое одного узла. Вычислительные операции производятся параллельно на всех серверах кластера, обеспечивая бесперебойную доступность сервисов в случае отказа одного из серверов.

- Серверные узлы. При проектировании отказоустойчивых кластеров серверные узлы должны обеспечивать возможность горячей замены ключевых компонентов (накопителей SAS/NVMe SSD, блоков питания, сетевых интерфейсов Ethernet SFP+), что снижает время восстановления работоспособности при сбоях. Особое внимание уделяется наличию нескольких независимых каналов электропитания и сетевого взаимодействия, исключающих единые точки отказа. Для интеграции с распределёнными системами хранения применяются HBA контроллеры прямого доступа к дисковым устройствам, обеспечивающие высокую пропускную способность и снижение накладных расходов при работе с данными.

- Сетевые соединения. Дублирование коммутаторов и маршрутизаторов с поддержкой пропускной способности не ниже 10 Gbit обеспечивает высокоскоростное бесперебойное взаимодействие как между узлами, так и с внешними кластерами. Использование двух и более сетевых интерфейсов на каждом сервере с агрегированием каналов повышает надёжность и производительность.

- Электропитание. Резервирование линий электропитания обеспечивается с помощью параллельного подключения узлов кластера к блокам распределения питания (PDU) и общей шине нагрузки с параллельно подключенными источниками бесперебойного питания (ИБП) с двойным преобразованием и функцией обхода (по формуле N+1), такая схема обеспечивает работоспособность узлов даже в случае выхода из строя ИБП и минимизирует риск простоя. Для достижения максимальной отказоустойчивости линий электропередачи рекомендуется подключать к двум независимым подстанциям.

- Комплект запасных частей. На случай полной потери работоспособности одного из ключевых узлов кластера, предусмотрена его замена на аналогичный работоспособный узел из состава комплекта запасных частей. Это снижает время простоя системы если кластер целиком вышел из строя, а в случае единичного отказа, позволяет системе в короткие сроки вернуть оптимальный уровень производительности и сохранить жизненный ресурс узлов.

На рисунке приведена схема аппаратного резервирования отказоустойчивого вычислительного кластера.

Приведенные выше принципы резервирования исключают единые точки отказа на уровне «железа» и обеспечивает фундаментальную основу систем высокой доступности.

Программная архитектура

- Система хранения. Для хранения данных используется распределённая система Ceph которая обеспечивает отказоустойчивость на уровне данных за счёт репликации объектов (минимум size = 3) между различными хостами. Это исключает потерю информации при выходе из строя отдельного узла или диска.

- Балансировка нагрузки. Для распределения запросов и исключения перегрузки отдельных узлов используются балансировщики нагрузки (NGINX, HAProxy).

- Виртуализация. Среды Proxmox, VMware позволяют организовать высокодоступные кластеры виртуализации с автоматическим перезапуском виртуальных машин

при отказе узлов, а также предоставляют механизмы миграции (Live Migration), позволяющие переносить виртуальные машины между узлами без прерывания работы сервисов.

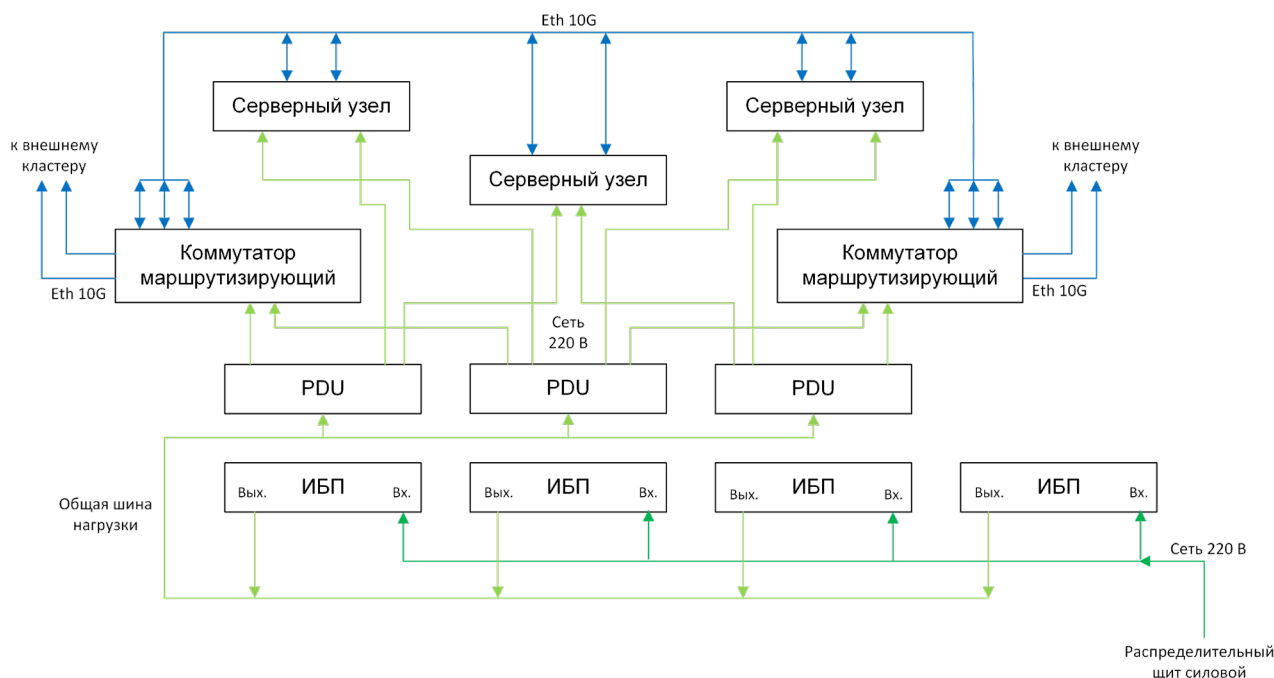


Схема аппаратного резервирования отказоустойчивого вычислительного кластера

- **Мониторинг и логирование.** Высокая доступность невозможна без развитой системы мониторинга и централизованного анализа событий. Для сбора метрик и визуализации состояния вычислительных узлов применяются решения наподобие Prometheus, Grafana и Zabbix, позволяющие выявлять деградацию производительности ещё до наступления критического сбоя. Для логирования широко используются системы централизованного сбора сообщений (rsyslog, syslog-ng).

Программная часть не заменяет аппаратного резервирования, но позволяет быстрее реагировать на аварии, снижать время простоя системы до восстановления (RTO) и объём потерянных данных при сбое (RPO).

Заключение

Проектирование отказоустойчивых вычислительных кластеров высокой доступности требует комплексного подхода. Аппаратное резервирование — ключевой фактор, исключающий единые точки отказа. Программные механизмы, такие как балансировка нагрузки, среда виртуализации и миграции, репликация данных мониторинг и управление отказами, усиливают защиту и обеспечивают гибкость управления ресурсами. Такое сочетание позволяет строить инфраструктуры, готовые к эксплуатации в критически важных отраслях, где непрерывность работы сервисов является обязательным условием.

В. В. Ворошилов¹, А. В. Иванов^{1,2}, Ю. В. Романов¹

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

²Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЕМОДУЛЯЦИИ ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ В КАНАЛЕ С АБГШ И СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПОМЕХАМИ

Аннотация. Посредством компьютерного имитационного моделирования проведена оценка помехоустойчивости модифицированных алгоритмов демодуляции большой системы дискретных частотных сигналов объемом 4096 размерностью 17×17 в канале с постоянными параметрами и аддитивным белым гауссовским шумом, сосредоточенными по частоте и времени помехами, сигналоподобными помехами, а также их совокупностью. Показано, что предложенные модификации известных алгоритмов обеспечивают существенное повышение помехоустойчивости.

Ключевые слова: дискретные частотные сигналы, большая система, станционная помеха, импульсная помеха, сигналоподобная помеха.

Для цитирования: Ворошилов В. В., Иванов А. В., Романов Ю. В. Помехоустойчивость модифицированных алгоритмов демодуляции дискретных частотных сигналов в канале с АБГШ и сосредоточенными помехами // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 32–34.

V. V. Voroshilov¹, A. V. Ivanov^{1,2}, Yu. V. Romanov¹

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

NOISE IMMUNITY OF MODIFIED ALGORITHMS FOR DEMODULATION OF DISCRETE FREQUENCY SIGNALS IN A CHANNEL WITH AWGN AND CONCENTRATED INTERFERENCE

Abstract. The article is devoted to the evaluation of the noise immunity of modified demodulation algorithms for large systems of discrete frequency signals with a volume of 4096 and a size of 17×17 in the channel with additive white Gaussian noise, frequency and time-concentrated interference, signal-like interference, as well as their combination, using computer simulation. It is shown that the proposed modifications provide significantly higher robustness to the interference relative to well-known algorithms.

Keywords: discrete frequency signals, large system, station interference, impulse interference, signal-like interference.

For citation: Voroshilov V. V., Ivanov A. V., Romanov Yu. V. Noise immunity of modified algorithms for demodulation of discrete frequency signals in a channel with AWGN and concentrated interference // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 32–34.

Дискретные частотные сигналы (ДЧС), известные также как частотно-временные сигналы, являются одним из видов широкополосных сигналов, используемых в том числе в коротковолновых (декаметровых) радиолиниях. При соответствующих параметрах сигнала и алгоритмах демодуляции они обеспечивают устойчивость к замираниям сигнала, а также сосредоточенным по времени (импульсным) и частоте (станционным) помехам.

Целью работы является синтез алгоритмов приема больших систем ДЧС-17, обладающих в канале с постоянными параметрами, аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) и сосредоточенными помехами большей помехоустойчивостью, чем известные алгоритмы.

Ранее был рассмотрен оптимальный алгоритм для канала с АБГШ и ранговый алгоритм.

Ранговый алгоритм обеспечивает большую (относительно оптимального) устойчивость к импульсным и сигналоподобным помехам за счет того, что вместо абсолютного значения отношения сигнал/шум в качестве веса элемента используется ранг, т.е. порядковый номер оценок сигнал/шум, расположенных по возрастанию значения. Таким образом, ранговый алгоритм ограничивает вес элемента.

Соответственно, для защиты от сигналоподобных помех ограничение веса элемента может быть внедрено и в оптимальный алгоритм приема.

С учетом анализа преимуществ и недостатков известных алгоритмов, в качестве модификаций, потенциально способных повысить устойчивость к сосредоточенным помехам, рассмотрены следующие:

- нормировка квадратов огибающих на выходе согласованного с сигналом фильтра к мощности шума, определяемой не для данного подканала, а для ДЧС в целом.
- исключение из анализа («вычеркивание») пораженных станционными помехами частотных подканалов, а также пораженных импульсными помехами временных слотов.
- ограничение веса отдельных элементов ДЧС значением 6 дБ.

Все описанные методы рассматривались как предварительная обработка, после осуществления которой веса невычеркнутых (и если сработало ограничение, то ограниченных по весу) слотов преобразовывались из веса в мощность, после чего запускался один из известных алгоритмов – оптимальный или ранговый.

Кроме того, с учетом наличия нормировки в самой модификации, дополнительно рассмотрена версия оптимального алгоритма приема, названная «упрощенный оптимальный», отличающаяся исключением нормировки в самом оптимальном алгоритме (нормировка к мощности шума для данного подканала).

Исследование осуществлялось посредством компьютерного имитационного моделирования. Станционная помеха имитировалась сигналом квадратурной амплитудной манипуляции с числом сигнальных точек 64, амплитуда помехи могла изменяться от слота к слоту в соответствии со значением символа, имитирующего помеху (в соответствии с выбранным сигнальным созвездием, возможно 9 дискретных значений амплитуды помехи, изменяющихся в диапазоне от минус 13,2 до плюс 3,7 дБ относительно среднеквадратического значения). Для импульсной помехи амплитуда всех 17 слотов оставалась неизменной.

В ходе исследования получено более 500 кривых помехоустойчивости, при обобщении результатов оценивалась помехоустойчивость при битовой вероятности ошибки 1×10^{-2} .

Отметим, что для сигналоподобных помех при отношениях помеха/сигнал около 0 дБ наблюдается резкое снижение помехоустойчивости. Это объясняется полным подавлением сигнала равномощной помехой при ее действии в противофазе (или в области сдвига фаз вблизи 180°). Если сигналоподобная помеха попадает в сигнальный слот и ее амплитуда в достаточной степени отличается от сигнала, то при любых фазовых соотношениях вес этого слота останется достаточно большим, так как демодулятор не может отличить сигналоподобную помеху от сигнала, соответственно, попадание сигналоподобной помехи в сигнальные слоты не снижает помехоустойчивость, если амплитуда помехи существенно больше или существенно меньше, чем амплитуда сигнала. Разница

фаз сигнала и помехи в используемой модели случайна, но при достаточно большом количестве сигналоподобных помех часть из них имеет близкую к 180° разницу фаз с некоторыми из сигнальных слотов, что и приводит к данному эффекту.

Заключение

1. Введение в известные алгоритмы приема дискретных частотных сигналов модификаций в виде ограничения веса отдельных элементов и исключения из обработки (вычеркивания) элементов, пораженных сосредоточенными по частоте (станционными) или времени (импульсными) помехами, позволило существенно повысить помехоустойчивость приема в каналах с мощными сосредоточенными помехами – максимально допустимое количество помех, на фоне которых сохраняется прием с вероятностью битовой ошибки не более 1 %, увеличилось в 2 раза относительно известных алгоритмов.

При этом в канале с постоянными параметрами и аддитивным белым гауссовским шумом введенные модификации привели к снижению помехоустойчивости на 0,1...0,4 дБ.

2. Наибольшая помехоустойчивость обеспечена для упрощенного оптимального алгоритма в совокупности с введенными модификациями. Разработанный упрощенный оптимальный алгоритм отличается от оптимального определением уровня шума по всей частотно-временной области, а не в каждом частотном подканале независимо от других, что повысило точность оценки уровня шума.

3. Введение вычеркивания для оптимальных алгоритмов позволило обеспечить устойчивость к 12 импульсным или станционным помехам, а также к их одновременному воздействию при общем количестве помех до 11.

Оптимальный алгоритм без модификаций обеспечивает устойчивость к 12 станционным помехам, но при этом полностью неработоспособен при воздействии импульсных помех.

Эффективно подавляемое вычеркивателем количество помех не зависит от их уровня, начиная с отношения помеха/сигнал порядка 10 дБ для импульсных и 13...14 дБ для станционных помех. Разница объясняется наличием пик-фактора 3,7 дБ у станционных помех.

В области отношений помеха/сигнал около 0 дБ максимально возможное количество подавляемых помех сохраняется, но требование к отношению сигнал/шум увеличивается приблизительно на 10 дБ для станционных помех и менее чем на 3 дБ для импульсных. Разница объясняется наличием пик-фактора у станционных помех.

4. Модификация в виде ограничения веса отдельных элементов показала себя как универсальный алгоритм, эффективно подавляющий все рассмотренные типы сосредоточенных помех, а также их совокупность. При этом только ограничение веса обеспечивает устойчивость к сигналоподобным помехам.

Оптимальные алгоритмы с ограничением веса отдельных элементов обеспечили устойчивость к помехам с отношением помеха/сигнал 13 дБ и более при следующем количестве помех:

- 11 станционных или импульсных, а также их одновременном воздействии при общем количестве до 11;
- 7 сигналоподобных;
- одновременном воздействии 4 станционных, 4 импульсных и 3 сигналоподобных.

5. Отсутствие адаптации рассмотренных алгоритмов к сигнально-помеховой обстановке приводит к возникновению несократимой вероятности ошибки на уровне порядка 1 % (для рассматриваемого ансамбля сигналов) при использовании ограничения на фоне близкого к предельному количества помех. Применение ограничения совместно с вычеркиванием на фоне мощных сосредоточенных помех обеспечивает меньшую помехоустойчивость, чем просто ограничение.

В. В. Зайцев^{1,2}, К. С. Фадеев^{1,2}, К. В. Авдеева^{1,2}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская Федерация

²Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Российская Федерация

ГРУППЫ КОНТРОЛИРУЕМЫХ И УПРАВЛЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ В КОГНИТИВНЫХ РАДИОЛИНИЯХ ДКМВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аннотация. Выполнена оценка функциональных особенностей радиолиний ДКМВ различного назначения. Предложены группы параметров контроля среды и управления ресурсами для поддержки когнитивных свойств различных радиолиний. Сформированы требования к программным и аппаратным ресурсам.

Ключевые слова: радиолинии ДКМВ, когнитивные системы радиосвязи, программные и аппаратные ресурсы.

Для цитирования: Зайцев В. В., Фадеев К. С., Авдеева К. В. Группы контролируемых и управляемых параметров в когнитивных радиолиниях ДКМВ различного назначения // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 35–36.

V. V. Zaitsev^{1,2}, K. S. Fadeev^{1,2}, K. V. Avdeeva^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation

GROUPS OF MONITORED AND CONTROLLED PARAMETERS IN COGNITIVE HF RADIO LINKS FOR VARIOUS PURPOSES

Abstract. The paper evaluates the functional features of HF radio links for various purposes. The authors propose groups of parameters for environmental control and resource management to support the cognitive properties of various radio links, as well as define requirements for software and hardware resources.

Keywords: HF radio links, cognitive radio communication systems, software and hardware resources.

For citation: Zaitsev V. V., Fadeev K. S., Avdeeva K. V. Groups of monitored and controlled parameters in cognitive HF radio links for various purposes // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 35–36.

Автоматические системы традиционно радиосвязи разрабатываются на базе модели OSI (BOC). Модель предусматривает жесткую последовательную иерархию уровней обработки сигналов и не допускает прямых переходов между несмежными уровнями. Это ведет к издержкам в вычислениях и большим задержкам.

Развитие когнитивных систем привело к созданию новых вариантов межуровневого взаимодействия, когда информация с физического или промежуточных уровней должна передаваться непосредственно на прикладной уровень и влиять на состояние системы.

В работе рассмотрены различные виды радиолиний ДКМВ. Для каждого вида предложена собственная группа параметров контроля среды и управления системой, обеспечивающая когнитивные процессы.

Выделены следующие виды радиолиний:

- стационарные магистральные радиолинии;
- стационарные сетевые абонентские радиолинии;
- стационарные абонентские радиолинии прямой связи;
- радиолинии мобильных абонентов стационарной сети;
- радиолинии мобильных абонентов подвижной сети.

Каждый вид радиолинии поддерживается собственной группой параметров и алгоритмов, обеспечивающих следующие функциональные возможности:

- оперативное вертикальное зондирование ионосферы;
- поляризационное зондирование каналов;
- способность СВХВ;
- оценка и автовыбор свободных частот;
- сеансовая частотная адаптация;
- адаптация по СКК;
- процедуры обнаружения и противодействия РЭП;
- процедуры и алгоритмы защиты информации;
- поддержка каналов и протоколов взаимодействия со смежными сетями.

В отличие от систем прямой радиовидимости радиолинии и радиосети ДКМВ требуют дополнительных программных и аппаратных ресурсов для поддержки технологий частотного и поляризационного зондирования ионосферных каналов. Объём и характер этих ресурсов существенно зависит от вида радиолинии.

Предложены варианты критериев интегральных оценок среды и электромагнитной обстановки для выбора рабочего режима. Предложены варианты критериев сравнительных оценок режимов максимальной эффективности.

Рассмотрены варианты программных и аппаратных платформ для реализации когнитивных радиолиний и сетей. Показано, что наиболее эффективными средствами поддержки когнитивных систем будут нейросети с соответствующим программным и аппаратным обеспечением. Процедуры формирования баз данных для обучения нейросетей осложняются динамикой состояния ионосферы и относительной краткосрочностью прогнозирования этого состояния.

Аппаратная реализация может быть выполнена на многоядерных процессорах с распараллеливанием вычислений.

М. П. Зубков^{1,2}, Д. Е. Зачатейский^{1,2}, Д. В. Сысоев^{1,2}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиопизики и физической электроники)

Омск, Российская Федерация

УСТАНОВКА ДЛЯ СБОРА ДАННЫХ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗА ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРНЫХ РАДИОКАНАЛОВ

Аннотация. Рассматривается вопрос создания экспериментальной установки, обеспечивающей автоматизированную регистрацию радиосигналов радиомаяков и предоставляющей информацию, необходимую для адаптации модели ионосферы Земли.

Ключевые слова: короткие волны, радиосигнал, ионосфера, экспериментальная установка.

Для цитирования: Зубков М. П., Зачатейский Д. Е., Сысоев Д. В. Установка для сбора данных, необходимых для повышения достоверности прогноза характеристик ионосферных радиоканалов // Радиотехника электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 37–39.

M. P. Zubkov^{1,2}, D. E. Zachateiskii^{1,2}, D. V. Sysoev^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

Omsk, Russian Federation

INSTALLATION FOR COLLECTING DATA NECESSARY TO INCREASE THE RELIABILITY OF FORECASTING THE CHARACTERISTICS OF IONOSPHERIC RADIO CHANNELS

Abstract. The paper considers the issue of creating an experimental setup that would provide automated recording of radio signals from radio beacons and provide information necessary for adapting the model of the Earth's ionosphere.

Keywords: short waves, radio signal, ionosphere, experimental setup.

For citation: Zubkov M. P., Zachateiskii D. E., Sysoev D. V. Installation for collecting data necessary to increase the reliability of forecasting the characteristics of ionospheric radio channels // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 37–39.

Изменчивость характеристик ионосферы Земли, являющейся средой распространения радиоволн коротковолнового (декаметрового) диапазона, требует проведения диагностики параметров, определяющих текущее состояние ионосферы. Использование данной информации при прогнозировании параметров коротковолновых радиоканалов способствует повышению точности оперативного и краткосрочного прогноза характеристик радиоканалов. При этом следует отметить, что существующие методы данного прогнозирования базируются на использовании той или иной модели ионосферы Земли. Адаптация модели позволяет существенно расширить временной интервал достоверности прогноза и границы географической зоны, в которой могут располагаться взаимодействующие радиостанции.

В совокупности известных методов вертикального, наклонного, возвратно-наклонного и трансионосферного зондирования ионосферы выделим метод пассивного зондирования. Он основан на приеме сигналов коротковолновых радиостанций, местоположение которых известно, а параметры излучаемых сигналов позволяют однозначно идентифицировать радиостанцию, их передающую.

Целью данной работы стало создание экспериментальной установки, обеспечивающей автоматизированную регистрацию радиосигналов и предоставляющую информацию, необходимую для адаптации модели ионосферы Земли.

В настоящее время на территории РФ в круглосуточном режиме работают радиомаяки, сигналы которых могут быть использованы для проведения пассивного зондирования. Сигналы различных радиомаяков традиционно рассматриваются как источники получения качественной информации о возможности прохождения радиосигнала по отдельным радионаправлениям. Нами предлагается использовать прием этих сигналов для адаптации к реальным условиям модели ионосферы Земли. Сигналы радиомаяков представляют собой излучение в классе А1А с использованием кодировочной таблицы Морзе. Каждому радиомаяку назначен определенный символ кодировочной таблицы. Таким образом, радиосигналы, излучаемые разными радиомаяками, различные, что обеспечивает их однозначную идентификацию.

В работе при создании экспериментальной установки требовалось обеспечить прием сигналов радиомаяков в условиях радиошумов, характерных для промышленной зоны города с использованием минимального набора аппаратных средств. Исходя из этого, основой установки стало многоканальное цифровое радиоприемное устройство, сопряженное с компьютером по стыку Ethernet. Основной задачей, решавшейся далее, стала разработка программного обеспечения, работающего на компьютере.

Результаты работы

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

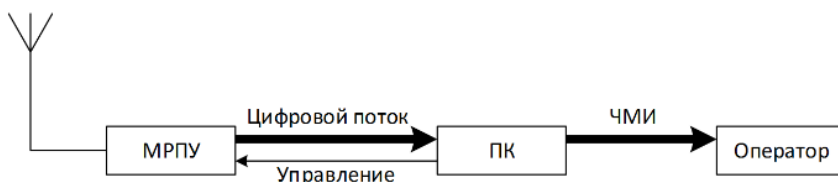


*Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:
МРПУ – многоканальное радиоприемное устройство; ПК – персональный компьютер;
ЧМИ – человеко-машинный интерфейс*

В качестве АФУ использована штыревая антенна высотой 6 м, установленная на крыше 4-этажного здания. Антенна соединялась со входом многоканального РПУ кабелем РК-75. С выхода РПУ сигнал, представляющий собой отсчеты квадратур, подается по стыку Ethernet на вход ПК. По тому же сетевому стыку организуется управление работой РПУ. Экспериментальная установка была развернута в г. Омске.

Структурная схема демодулятора приёма радиосигналов приведен на рис. 2.

Демодулятор экспериментальной установки, созданной в ИРФЭ ОНЦ СО РАН автоматически выделяет радиосигнала из шумов, измеряет его уровень и фиксирует требуемые моменты времени, когда уровень сигнала становится больше или меньше уровня радиошумов.

Результатом работы экспериментальной установки является автоматическая регистрация сигналов, позволяющая в ходе дальнейшей обработки определить наличие/отсутствие радиоприема сигнала на конкретной радиочастоте, регистрировать время появления сигнала в «эфире» (начала приема) и окончания приема сигналов. Это

позволяет реализовать дальнейшую обработку данной информации с целью получения МПЧ радиотрасс и определения эффективного числа Вольфа.

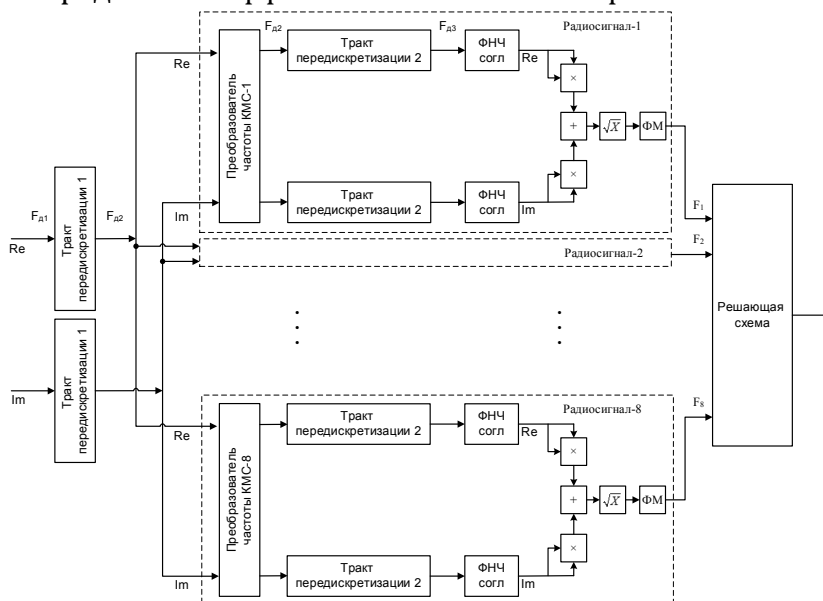


Рис. 2. Структурная схема демодулятора приема радиосигналов

В ходе проведенных в 2023–2025 гг. экспериментов показана возможность устойчивого приема радиосигналов, расположенных в городах Москва, Севастополь, Астрахань. Единичного приема радиосигналов маяков, расположенных в городах Калининград, Североморск.

Обсуждение результатов

Для автоматического обнаружения радиосигнала желательно знать не только рабочую частоту, на которой он должен регистрироваться, но и другие его характеристики. На этапе начального приема радиосигнала, характерного для превышения значений максимально-применимой частоты радиолинии рабочей частоты радиомаяка, характерны замирания сигнала. Рекомендуется регистрировать этот интервал времени и для установления «времени начала радиоприема» использовать значения времени, соответствующего середине данного интервала.

В целом в результате проведенной работы, показана возможность приема сигналов радиомаяков в условиях города с качеством, обеспечивающим адаптацию моделей ионосферы Земли.

Заключение

Цифровые радиоприемные устройства, применяемые на приемных коротковолновых радиоцентрах, могут быть использованы для пассивной диагностики текущего состояния ионосферы Земли.

Проведенные эксперименты показали возможность приема сигналов радиомаяков, удаленных от приемника на расстояния в несколько тысяч км в городских условиях, что позволяет считать возможным такой радиоприем и при лучшей помеховой обстановке.

Приведенная в работе архитектура программного обеспечения может быть реализована при выполнении работ по созданию программно-аппаратных комплексов, решающих подобные задачи.

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

А. В. Колобков, Д. В. Хитева

Научно-производственное предприятие «Полет»

Нижний Новгород, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КОДОВ

Аннотация. Представлен обзор основных видов низкоскоростных помехоустойчивых кодов: суперортогонального сверточного кода, сверточного кода максимального свободного расстояния и суперортогонального турбокода. Проведена оценка их помехоустойчивости и вычислительной сложности. На основании полученных результатов определен низкоскоростной код, обеспечивающий минимальное значение вероятности ошибки на бит при относительно невысокой вычислительной сложности.

Ключевые слова: низкоскоростной код, суперортогональный сверточный код, сверточный код максимального свободного расстояния, суперортогональный турбокод.

Для цитирования: Колобков А. В., Хитева Д. В. Особенности формирования низкоскоростных помехоустойчивых кодов // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 40–42.

A. V. Kolobkov, D. V. Khiteva

Research and Production Company “Polyot”, Nizhniy Novgorod, Russian Federation

SPECIFICS OF CONSTRUCTING LOW-RATE ERROR-CORRECTING CODES

Abstract. The paper provides an overview of the main types of low-rate error-correcting codes: super-orthogonal convolutional code, maximum free distance convolutional code, super-orthogonal turbo code. Their noise immunity and arithmetic decoding complexity have been assessed. Based on the results obtained, a low rate code has been determined that provides a minimum error probability per bit with relatively low arithmetic decoding complexity.

Keywords: low-rate code, super-orthogonal convolutional code, maximum free distance convolutional code, super-orthogonal turbo code.

For citation: Kolobkov A. V., Khiteva D. V. Specifics of constructing low-rate error-correcting codes // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 40–42.

К современным средствам связи зачастую выдвигаются требования обеспечения адаптации скорости передачи информации к состоянию канала связи. Адаптация реализуется сменой сигнально-кодовой конструкции или ее параметров в зависимости от сигнально-помеховой обстановки в точке приема. В условиях низкого отношения сигнал-шум и наличия помех возникает задача по выбору типа помехоустойчивого кода с высокой исправляющей способностью, к которым относятся низкоскоростные коды. Целью работы является определение наиболее эффективного низкоскоростного кода и методов его построения.

Низкоскоростные коды широко применяются в системах связи с расширением спектра методом прямой последовательности. Наиболее известны четыре класса таких кодов: ортогональные блочные коды, суперортогональные сверточные коды, сверточные коды максимального свободного расстояния и суперортогональные турбокоды.

Известно, что ортогональные блочные коды хорошо работают в каналах с очень

высоким уровнем шума. В силу ортогональности таких кодов расстояние между любыми двумя различными кодовыми словами является большим, что увеличивает эффективность кодирования. Самым известным примером ортогонального блочного кода является код Уолша, применяемый в стандартах сотовой связи CDMA2000, IS-95, UMTS.

Суперортогональный сверточный код работает по принципу классического сверточного кода, но с использованием набора ортогональных кодовых слов в качестве алфавита. Ветви решетки суперортогонального сверточного кода, выходящие из одного и того же состояния или возвращающиеся в одно и то же состояние, являются антиподами. Таким образом, суперортогональный сверточный код соединяет в себе большое расстояние между кодовыми словами ортогональных кодов с выигрышем от кодирования при использовании памяти кода, обеспечиваемым сверточной структурой. Кроме того, такой код обладает преимуществом в виде относительно простого декодера.

Сверточный код максимального свободного расстояния имеет наибольшее возможное значение свободного расстояния среди всех других кодов с такими же параметрами скорости и длины кодового ограничения. Структура этих кодов аналогична обычным сверточным кодам. При заданном объеме памяти и скорости кодирования обобщающие полиномы, дающие максимальное свободное расстояние, выводятся из исходного кода с помощью поиска вложенного кода. Важной характеристикой вложенных кодов является повторное использование генераторных многочленов для достижения низких скоростей. Таким образом, сверточный код максимального свободного расстояния со скоростью $1/n$ может быть сгенерирован с помощью n различных многочленов-генераторов. Эта повторяющаяся структура может быть использована для уменьшения сложности кодирования и декодирования кода. Сверточные коды максимального свободного расстояния используются в стандартах Wi-Fi 802.11, в цифровом теле- и радиовещании в стандартах DVB-T, DVB-S, DAB.

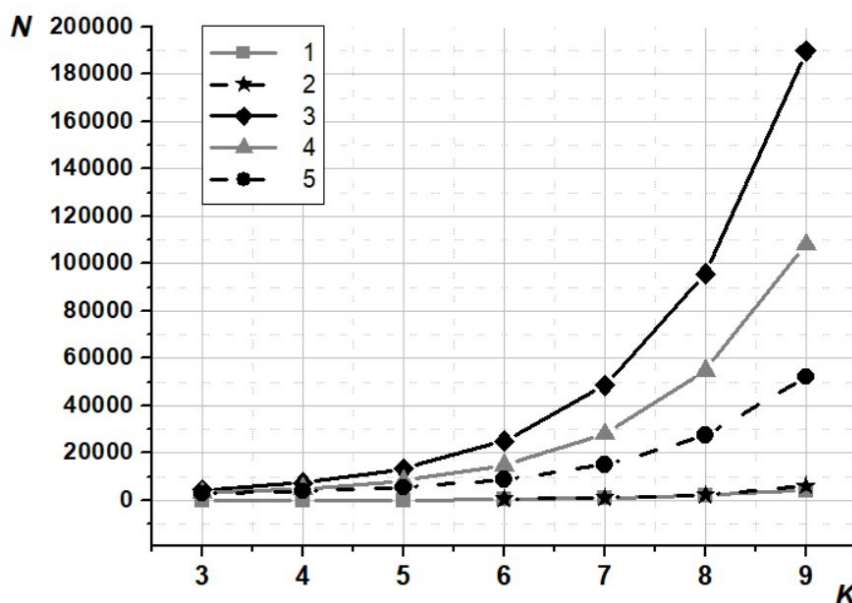
Дальнейшим шагом в развитии низкоскоростного кодирования стало создание суперортогональных турбокодов. В основе лежит идея объединить принцип турбокодирования со свойством большого расстояния между кодовыми словами суперортогональных сверточных кодов. Низкоскоростные турбокоды могут быть созданы двумя путями: первый – использование низкоскоростных компонентных кодеров; второй – расширение структуры дополнительными компонентными кодерами. Вторая стратегия влечет за собой значительное увеличение сложности программной реализации кодека, поэтому на практике применяется первый метод. Таким образом, в структуре суперортогонального турбокода чаще всего используются два суперортогональных сверточных кода, соединенных перемежителем. Коды компонентов здесь несистематичны. Последовательности четности кодов компонентов генерируются путем сложения по модулю два первого и последнего битов регистра в ортогональную последовательность Уолша-Адамара. Суперортогональные сверточные компонентные кодеры из-за своей ортогональной природы имеют меньше кодовых слов с малым весом по сравнению с традиционно применяемыми в турбокоде рекурсивными систематическими сверточными кодами. Это напрямую ведет к более низкой вероятности ошибки на бит особенно на линии насыщения, которая у суперортогонального турбокода начинается на более низких значениях вероятности ошибки на бит, что позволяет обеспечить высокую надежность.

Важным вопросом при выборе кодека в системе связи является оценка его вычислительной сложности. Сравнение вычислительной сложности рассматриваемых кодов и алгоритмов декодирования требует оценки сложности реализации элементарных операций. Для этого оценивается арифметическая сложность декодирования операций сложения, умножения, максимизации и поиска. Каждая операция представляется в виде од-

ной единицы сложности N . Результат оценки вычислительной сложности для рассматриваемых кодов представлен на рисунке, где изображена зависимость вычислительной сложности от длины кодового ограничения K . Вычисления проведены для кодов со скоростью $1/16$, длина сообщения составляла 100 бит.

Как видно из рисунка, наименьшей вычислительной сложностью обладают суперортогональный сверточный код и сверточный код максимального свободного расстояния с алгоритмом декодирования Витерби. Наибольшей вычислительной сложностью обладают турбокоды, потому что процесс турбодекодирования имеет итерационную структуру, и каждая итерация состоит из двух последовательных операций декодирования с промежуточным перемежением. Среди алгоритмов декодирования турбокода наименьшей вычислительной сложностью обладает алгоритм SOVA.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что суперортогональные сверточные коды обеспечивают помехоустойчивость, сравнимую с помехоустойчивостью сверточных кодов максимального свободного расстояния. Суперортогональные турбокоды обеспечивают более высокую помехоустойчивость, чем сверточные коды максимального свободного расстояния. Для суперортогонального турбокода меньшее значение вероятности ошибки на бит обеспечивает алгоритм декодирования max-log-MAP.



Оценка арифметической сложности декодирования:

- 1 – суперортогональный сверточный код с декодированием Витерби;
- 2 – сверточный код максимального свободного расстояния с декодированием Витерби;
- 3 – суперортогональный турбокод с декодированием log-MAP;
- 4 – суперортогональный турбокод с декодированием max-log-MAP;
- 5 – суперортогональный турбокод с декодированием SOVA

Таким образом, наиболее эффективным низкоскоростным кодом является суперортогональный турбокод, сформированный из двух суперортогональных сверточных кодеров. Меньшее значение вероятности ошибки на бит позволяет получить алгоритм декодирования max-log-MAP, в то время как алгоритм декодирования SOVA обладает меньшей вычислительной сложностью. Поэтому выбор алгоритма декодирования остается на усмотрение разработчика, исходя из требований к достигаемым техническим характеристикам средства связи и вычислительной мощности применяемой элементной базы.

М. А. Колосов

ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», Санкт-Петербург, Российская Федерация

АНОМАЛЬНОСТЬ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ КАК ПРЕДИКТОР НАРУШЕНИЯ КВ-РАДИОСВЯЗИ

Аннотация. Проведен статистический анализ значений очков аномальности, полученных в результате применения алгоритма «изоляционный лес» к данным наблюдения за ионосферой Земли с 16 станций вертикального зондирования в период с 2020 по 2023 год. Выявлена статистическая связь между повышенным значением очков аномальности наблюдения и нарушением КВ-радиосвязи в течение следующего за этим наблюдением часа, которая более явно проявляется в высоких широтах.

Ключевые слова: ионосфера Земли, КВ-радиосвязь, станция вертикального зондирования ионосферы Земли, машинное обучение, аномалии, алгоритм «изоляционный лес», выдвижение статистических гипотез, статистический тест Манна-Уитни, вероятность превосходства.

Для цитирования: Колосов М. А. Аномальность состояния ионосферы как предиктор нарушения КВ-радиосвязи // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 43–45.

М. А. Kolosov

MESC of the Navy "Naval Academy", Saint-Petersburg, Russian Federation

IONOSPHERIC STATE ANOMALY AS A PREDICTOR OF HF RADIO COMMUNICATION DISRUPTION

Abstract. The paper is devoted to the statistical analysis of anomaly scores, obtained by applying the Isolation Forest algorithm to ionospheric observation data from 16 vertical sounding stations between 2020 and 2023. A statistical association was identified between elevated anomaly scores in the observation and the disruption of HF radio wave propagation within the subsequent hour. This association was found to be particularly pronounced at high latitudes.

Keywords: Earth's ionosphere, HF radio communication, vertical sounding station, machine learning, anomalies, Isolation Forest algorithm, statistical hypothesis formation, Mann-Whitney U test, probability of superiority.

For citation: Kolosov M. A. Ionospheric state anomaly as a predictor of HF radio communication disruption // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 43–45.

Эта работа входит в цикл исследования возможностей оперативного прогноза КВ-радиосвязи с помощью методов машинного обучения. Главная задача всего цикла состоит в создании моделей на основании ансамблевых алгоритмов машинного обучения, и их последующая интерпретация, что позволит создать эмпирические правила оперативного прогнозирования на основании текущего состояния ионосферы.

В предыдущей работе с помощью алгоритма CART была получена модель «дерево решений», которая прогнозирует образование спорадического слоя E ионосферы в течение следующего часа. Обучающая выборка была сформирована из годовой таблицы ионосферных наблюдений в формате IONKA со станции вертикального зондирования

ионосферы Gorkovskaya, ежедневных данных планетарного индекса геомагнитного возмущения ap и плотности потока Солнечного радиоизлучения за 2020 год. Рабочие метрики полученной модели сопоставимы с метриками моделей, основанных на полиномах второй степени.

Для дальнейшей реализации потенциала машинного обучения существует подход предварительной обработки данных. Одним из направлений данного подхода является удаление выбросов – редких наблюдений, выделяющихся из основных кластеров наблюдений в пространстве признаков. Подход предполагает, что эти наблюдения являются ошибками или статистическим шумом. Их удаление позволяет повысить разделительную способность классификатора.

С точки зрения пространства признаков разницы между выбросами и аномалиями не существует, разница обусловлена лишь интерпретацией. Поэтому в литературе используется обобщенное понятие «алгоритмы поиска аномалий», обозначающее множество классификаторов, производящих разделение наблюдений на группы «аномальных» (выброс) или «нормальных».

Учитывая особенности таблицы признаков обучающей выборки (наличие количественных и категориальных признаков, пропущенных значений), наиболее рациональным для решения этой задачи является алгоритм поиска аномалий «изоляционный лес» (iForest). Этот алгоритм присваивает каждому наблюдению значение очков аномальности в диапазоне от 0 до 1. Чем выше это значение, тем больше наблюдение отличается от нормальных наблюдений (более аномально). Разделение наблюдений на «аномальные» и «нормальные» производится путем сравнения с порогом, выставляемым с учетом допустимого количества ошибок 1-го или 2-го рода.

В этом исследовании используются 16 обучающих выборок, полученных с различных станций вертикального зондирования ионосферы в период с 2020 по 2023 год. Полный перечень станций показан на рис.1. В качестве целевой переменной используется индикатор регистрации слоя F2 ионосферы (который характеризуется численным значением критической частотой f_oF2 в годовой таблице ионосферных наблюдений) или отсутствие регистрации слоя F2, например, вследствие экранирования спорадическим слоем E, избыточного поглощения и т.д. в следующий за наблюдением час, что можно интерпретировать как возможность ведения КВ-радиосвязи или ее нарушение в течение следующего часа. Идея в следующем: основной механизм КВ-радиосвязи заключается в рефракции радиоволн в слое F2 ионосферы. Периодическое нарушение этого механизма, вызванное различными ионосферными явлениями, приводит к нарушению КВ-радиосвязи.

При разведочном анализе данных установлено, что метки класса нарушения КВ-радиосвязи представлены крайне малочисленной группой. Для станций вертикального зондирования ионосферы Земли Elektrogl, Gorkovskaya, Kaliningrad, Khabarovsk, Novosibirsk, Petropavlovsk, Rostov, Tomsk их доля составляет менее 10% всех наблюдений с 2020 по 2023 год.

Удаление выбросов в данном случае неприменимо: оно приведет к удалению наблюдений, имеющих метку минорного класса целевой переменной, которых и так мало. То есть произойдет потеря редких комбинаций признаков, что приведет к уменьшению разнообразия обучающей выборки и, соответственно, ухудшению разделительной способности классификатора.

В здравоохранении, защите от мошенничества, экологии встречается ряд задач, когда высокое значение очков аномальности означает принадлежность наблюдения к определенному классу целевой переменной.

Автором выдвинуто предположение, что задача предсказания состояния ионо-

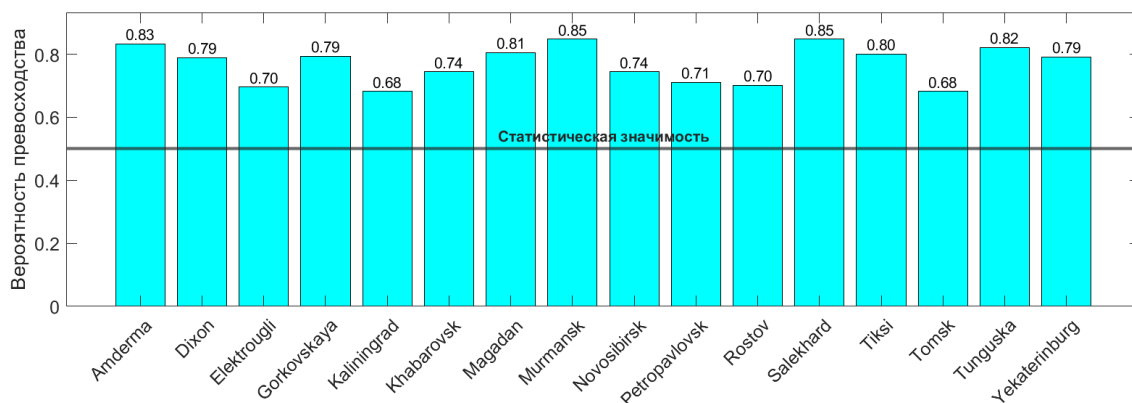
сферы Земли также имеет эту особенность. Идея состоит в том, что, если нет возможности удалить наблюдения с высоким значением очков аномальности, надо максимально эти очки использовать.

Таким образом, была выдвинута гипотеза, что повышенное значение очков аномальности в этом случае не просто последствия статистического шума, а именно значимый признак, знаменующий появление ионосферных явлений, добавление которого в обучающую выборку приведет к повышению рабочих метрик моделей, разрабатываемых в цикле исследований. Проверить эту гипотезу возможно путем доказательства существования статистической связи между значениями очков аномальности и целевой переменной.

Все 16 таблиц признаков обучающих выборок были обработаны алгоритмом iForest, в результате каждому наблюдению было присвоено значение очков аномальности.

Для проверки выдвинутой гипотезы к каждой выборке был применен статистический непараметрический тест Манна-Уитни. Разбиение на подвыборки производилось на основании принадлежности наблюдений к различным классам целевой переменной, а в качестве признака использовались значения очков аномальности. В качестве нулевой гипотезы принято утверждение, что систематической разницы значений очков аномальности между подвыборками целевой переменной не существует. В качестве альтернативной гипотезы принято утверждение, что разница есть.

Во всех 16 случаях была принята альтернативная гипотеза. Статистический тест показал систематически более высокие значения очков аномальности наблюдений, имеющих класс целевой переменной нарушения КВ-радиосвязи в течение следующего часа. Значение силы статистической связи, выраженное через вероятность превосходства (POS)(см. рисунок), показало во всех случаях значимую статистическую связь, а для станций, находящихся выше 59 параллели, сильную статистическую связь (больше 0,8).



Вероятность превосходства класса целевой переменной «нарушение КВ-радиосвязи в течение следующего часа» для различных станций вертикального зондирования ионосферы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- высокие значения очков аномальности наблюдения, полученных с помощью алгоритма iForest, являются предиктором нарушения КВ-радиосвязи;
- для высокоширотных СВЗИ статистическая зависимость нарушения КВ-радиосвязи и очков аномальности, полученных с помощью алгоритма iForest, выражена более явно.

Полученные результаты показывают возможность использования значений очков аномальности, присваиваемых наблюдениям алгоритмом iForest, в качестве еще одного релевантного признака в обучающих выборках для моделей оперативного прогноза нарушения КВ-радиосвязи. Выдвинутая гипотеза подтверждена.

О. А. Копылова, М. С. Хайретдинов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ШУМАХ

Аннотация. Рассматривается проблема повышения дальности обнаружения движущегося транспорта на основе данных сейсмоакустических колебаний. В качестве примеров анализируются железнодорожный, тяжелый гусеничный и колесный виды транспорта. Решение проблемы основано на квадратурном алгоритме обработки. Определены основные частоты транспортных шумов в зависимости от скорости движения и дальности. Результаты могут быть полезны для решения задач геоэкологии, геомониторинга, в системах охранной сигнализации.

Ключевые слова: сейсмические и акустические колебания, обнаружение транспорта, квадратурный анализ, транспортные шумы.

Для цитирования: Копылова О. А., Хайретдинов М. С. Повышение дальности обнаружения транспортных колебаний в шумах // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 46–47.

О. А. Kopylova, M. S. Khairatdinov

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

INCREASING THE DETECTION RANGE OF TRANSPORT VIBRATIONS AGAINST A BACKGROUND OF NOISE

Abstract. The problem of increasing the detection range of moving vehicles based on seismo-acoustic vibration data is considered. Railway, heavy tracked, and wheeled vehicles are analyzed as examples. The solution to the problem is based on a quadrature processing algorithm. The fundamental frequencies of vehicle noise are determined depending on the speed of movement and distance. The results may be useful for solving problems in geoecology, geomonitoring, and security alarm systems.

Keywords: seismic and acoustic oscillations, transport detection, quadrature analysis, vehicle noise.

For citation: Kopylova O. A., Khairatdinov M. S. Increasing the detection range of transport vibrations against a background of noise // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 46–47.

Проблема геофизического мониторинга окружающих техногенных и природных шумов в связи с их возрастающим воздействием на социальную среду приобретает все более высокую актуальность. Интенсивные техногенные шумы оказывают разрушающее воздействие на инфраструктуру, негативно влияет на самочувствие и здоровье людей. Одной из первостепенных задач при мониторинге в режиме реального времени является обнаружение источников повышенного шумового и вибрационного загрязнения.

Учитывая случайную природу полезного транспортного сигнала, решение задачи его обнаружения реализуется с использованием порогового алгоритма обнаружения, основанного на вычислении энергетической характеристики сигнала.

Рассматривается задача максимизации критерия обнаружения с целью повышения дальности обнаружения на примере выделения характерных низкочастотных составляющих транспортных источников на фоне внешних шумов. Для этого используется предварительная фильтрация колебаний из широкополосного шума с учетом характерных частотных составляющих транспортных колебаний.

В качестве основного инструмента фильтрации предлагается применение цифровой адаптивной квадратурной фильтрации полезных транспортных колебаний на фоне мешающих шумов. Процесс адаптации предполагает слежение за текущими частотными характеристиками колебаний, которые определяется режимами движения транспортного средства. Порядок работы предлагаемого алгоритма фильтрации следующий.

По отношению к текущим транспортным колебаниям применяется оконный спектрально-временной анализ. В каждом окне определяется спектральная мода текущего транспортного колебания и соответствующая ему преобладающая частота.

Выделенные частоты используются в качестве опорных для квадратурной фильтрации текущих колебаний в заданном окне. В этом заключается смысл адаптивной квадратурной фильтрации. В результате работы адаптивного квадратурного алгоритма вычисляются статистики функции амплитуды и фазы колебания в текущем временном окне для гармонического колебания.

Преимущество данного алгоритма перед другими алгоритмами состоит в том, что он может обрабатывать входные данные в поточном режиме реального времени.

Рассмотренный алгоритм опробован на данных реальных экспериментов. В качестве частного примера на рисунке представлены результаты одновременной обработки с помощью квадратурного алгоритма и с использованием полосового фильтра Баттерворда в характерной полосе частот транспортного колебания грузового поезда, равной 6 Гц.



Результат работы алгоритма обнаружения движущегося грузового поезда по акустическим колебаниям

Здесь показаны результаты обнаружения одновременно для трех случаев: без предварительной фильтрации, с полосовой фильтрацией в диапазоне 5-12 Гц и квадратурной фильтрацией.

Во всех приведенных случаях окно усреднения энергетического алгоритма обнаружения составляло 5 сек. Порог обнаружения устанавливался равным 3 среднеквадратическим отклонениям. Расстояние точки регистрации от железнодорожных путей составляет около 160 м. Из приведенных графиков видно, что использование квадратурного алгоритма для обнаружения источников узкополосных сигналов позволяет снизить количество ложных срабатываний и соответственно обладает большей помехоустойчивостью.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0004.

Т. В. Леванова

Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Омский филиал
Омск, Российская Федерация

ОДИН ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ РАДИОВЫШЕК

Аннотация. Организация радиосвязи в районах Крайнего Севера является одним из приоритетных направлений экономики. Решение возникающей при этом проблемы определения мест расположения приёмопередающих устройств является целью данного исследования. В работе предлагается подход, основанный на современных тенденциях решения сложных задач. Для этого выписана математическая модель задачи размещения радиовышек, разработан и протестирован на модельных примерах алгоритм решения жадного типа.

Ключевые слова: организация радиосвязи, многостадийные задачи размещения, целочисленное программирование, дискретная оптимизация, жадный алгоритм.

Для цитирования: Леванова Т. В. Один подход к решению задачи размещения радиовышек // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 48–49.

T. V. Levanova

Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, Omsk Department, Omsk, Russian Federation

ONE APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF LOCATION OF RADIO TOWERS

Abstract. The organization of radio communications in the Far North is one of the priority areas of the economy. The purpose of this study is to solve the problem of determining the location of the receiving and transmitting devices. The paper proposes an approach based on current trends in solving complex problems. For this purpose, a mathematical model of the problem of location of radio towers has been written out, and a greedy-type solution algorithm has been developed and tested on model examples.

Keywords: organization of radio communication, multi-stage location problems, integer programming, discrete optimization, greedy algorithm.

For citation: Levanova T. V. One approach to solving the problem of location of radio towers // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 48–49.

Организация радиосвязи в районах Крайнего Севера является одним из приоритетных направлений экономики. При этом возникает проблема выбора мест размещения вышек приемо-передающих устройств. В силу редкой населенности рассматриваемого региона специалисты считают целесообразным размещение передатчиков внутри материка, а затем ретранслирование сигнала потребителям. Ретрансляторы позволяют увеличить расстояние передачи, снижая затраты на обслуживание. В работе рассматривается вариант, при котором сигнал от передатчика к потребителю проходит через два ретранслятора, т.е. существует много стадий передачи. Для решения предлагается использовать аппарат дискретной оптимизации, в которой задачи размещения объектов занимают отдельную активно развивающуюся область. В ней рассматриваются задачи размещения с различными условиями, в том числе и многостадийные задачи. В нашем случае мы имеем трехстадийную задачу, в которой на вышках первой стадии расположены

передатчики, вторую и третью стадии составляют ретрансляторы. Таким образом, имеется множество потребителей и множество пунктов возможного размещения вышек передатчиков (первая стадия) и ретрансляторов (вторая и третья стадии). Известны затраты на размещение вышки в каждом пункте, а также области покрытия радиосигналом. Необходимо определить места размещения вышек передатчиков и ретрансляторов, так чтобы все потребители были снабжены радиосигналами.

Предполагается, что экспертами определены места возможного размещения передатчиков и ретрансляторов, а также зоны покрытия радиосигналом. В работе построена математическая модель трехстадийной задачи размещения, использующая аппарат целочисленного линейного программирования. В ней моделируются пути (цепочки), по которым могут проходить сигналы от передатчиков к потребителям. Таким образом в этих терминах, необходимо найти множество цепочек наименьшей стоимости, покрывающих радиосигналом всех потребителей. Ранее в работах различных авторов рассматривались двухстадийные задачи размещения радиовышек, а также многостадийные задачи размещения, в которых присутствовали затраты на обслуживание.

С вычислительной точки зрения задача NP-трудна. Для труднорешаемых задач современные тенденции поиска решения заключаются в построении приближенных алгоритмов, получающих результаты высокого качества за относительно небольшое время. Для рассматриваемой задачи был построен алгоритм жадного типа, обладающий этими свойствами. Он состоит из двух этапов: на первом этапе строится допустимое решение. Начальное допустимое решение состоит из набора цепочек, при их выборе учитываются затраты на установку вышек. На втором этапе происходит улучшение текущего решения. Для этого в начальном решении исходные технологические цепочки заменяются на цепочки с меньшей стоимостью, если это возможно.

Для определения качества предложенного алгоритма построены серии тестовых примеров различной сложности, поиск оптимального решения выполнен с использованием решателя CPLEX. Экспериментальные исследования показали, что алгоритм позволяет находить решение задачи с отклонением не более 6% от оптимального. Предложенный подход можно использовать для любого редконаселенного региона. Возможно построение более сложных моделей и усовершенствования метода с учетом дополнительных условий, например, надежности.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМ СО РАН, FWNF-2022-0020.

Р. М. Махманазаров, Д. Я. Суханов

Национальный исследовательский Томский государственный университет
Томск, Российская Федерация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ В СИСТЕМАХ РАДИОВОЛНОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Аннотация. Описан подход использования вихревого радиоволнового поля с орбитальным угловым моментом в качестве зондирующего с целью восстановления изображения по результатам измерений квадратур рассеянного поля. Представлены решения прямой и обратной задачи восстановления изображения зондируемого объекта. Решения сравнивались с решением для невихревых полей. По результатам моделирования была показана возможность восстановления радиоизображения сканируемых объектов при моностатической схеме зондирования.

Ключевые слова: томография, вихревое поле, орбитальный угловой момент, согласованная фильтрация, обратные задачи.

Для цитирования: Махманазаров Р. М., Суханов Д. Я. Использование вихревого волнового поля в системах радиоволнового зондирования // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 50–52.

R. M. Makhmanazarov, D. Y. Sukhanov

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

APPLICATION OF VORTEX WAVE FIELDS IN RADIO WAVE PROBING SYSTEMS

Abstract. This work describes an approach to using vortex radio wave fields with orbital angular momentum as a probing signal for image reconstruction based on measurements of the quadrature components of the scattered field. Solutions to both the forward and inverse problems of image reconstruction for the probed object are presented. These solutions are compared with those obtained for non-vortex fields. The study reveals the possibility of image reconstruction of scanned objects using a monostatic measuring scheme.

Keywords: tomography, vortex field, orbital angular momentum, matched filtering, inverse problems.

For citation: Makhmanazarov R. M., Sukhanov D. Y. Application of vortex wave fields in radio wave probing systems // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 50–52.

Исследования вихревых полей с орбитальным угловым моментом (ОУМ) в радиофизике и оптике демонстрируют их перспективность для улучшения характеристик систем связи. В частности, показано, что ОУМ позволяет разделять моды информационных каналов, что может быть полезно при решении обратных задач томографии. Однако большинство работ посвящено оптическому диапазону, тогда как применение вихревых полей в миллиметровом диапазоне (24 ГГц) изучено недостаточно. В существующих работах отмечаются преимущество вихревых систем зондирования по сравнению с традиционными, благодаря улучшению разрешающей способности по азимуту. При этом томографическая система характеризуется бистатической схемой зондирования. В данной

работе предлагается подход к моделированию вихревых полей в моностатических системах радиоволновой томографии.

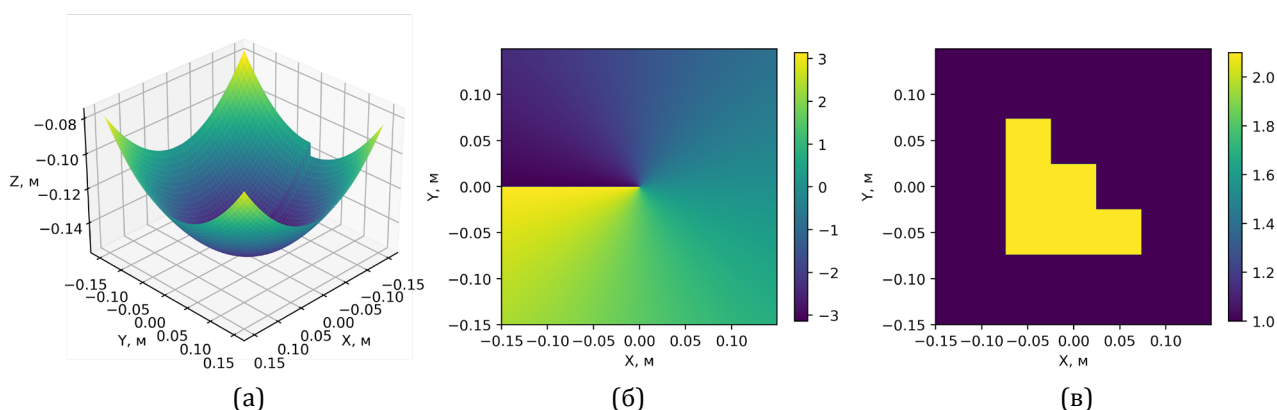


Рис. 1. Модель вихревого параболоида (а), его фазовое распределение (б) и форма сканируемого объекта (в)

Вихревое поле с орбитальным угловым моментом формировалось с помощью параболического рефлектора размерами $L=0.3$ м, поверхность которого была модифицирована для придания волновому фронту орбитальный угловой момент величиной $m=\pm 1, \pm 2, \dots, N$ (рис. 1а,б). Прямая задача решалась в скалярном и борновском приближениях. В качестве облучателя в фокусе рефлектора использовалась функция Грина точечного источника для сферической волны с частотой 24 ГГц ($\lambda=0.0125$ м). Распространение волны рассматривалось в четыре этапа:

1. От фокуса рефлектора (фокусное расстояние 0,15 м) до апертуры параболоида – определялось начальное распределение поля с учетом вихревой модуляции поверхностью параболоида (рис 1б).
2. От апертуры параболоида до объекта на расстоянии D — волна свободно распространялась в дальней зоне, сохраняя структуру ОУМ.
3. Рассеяние на объекте без поглощения и обратное распространение к рефлектору.
4. От поверхности рефлектора в его фокус – с учетом повторной модуляции поверхности параболоида.

В фокусе параболоида регистрировались квадратуры комплексного сигнала $U=I+iQ$.

Объект задавался в виде трехступенчатой формы, с размерами «ступеньки» 5 см (рис. 1в). Для восстановления распределения источников рассеянного излучения использовался метод обратной свертки с регуляризацией. В качестве аппаратной функции томографической системы использовались измерения поля точечного источника. Расчет прямой задачи осуществлялся в координатной сетке 512 на 512 точек. На длину волны приходилось 7 точек. Сканирование плоскости с объектом осуществлялось на расстоянии 1 м, площадью 0,9 на 0,9 м (64 на 64 точки), с шагом 0.88λ .

На рис. 2 представлено восстановление изображения зондируемого объекта для различных видов зондируемого поля.

Как видно из рис. 2, восстановленный объект локализован в соответствии с заданными координатами и размерами. По рис. 2б и рис. 2в заметно различие регистрируемых квадратур. Качественная оценка восстановленных изображений показывает, что различие между традиционным сканированием и вихревым незначительное. Однако в случае с вихревым полем, регистрация сигнала осуществляется в области минимума интенсивности (из-за фазовой сингулярности в центральной области пучка), в то время как невихревое поле фокусируется с максимальной интенсивностью.

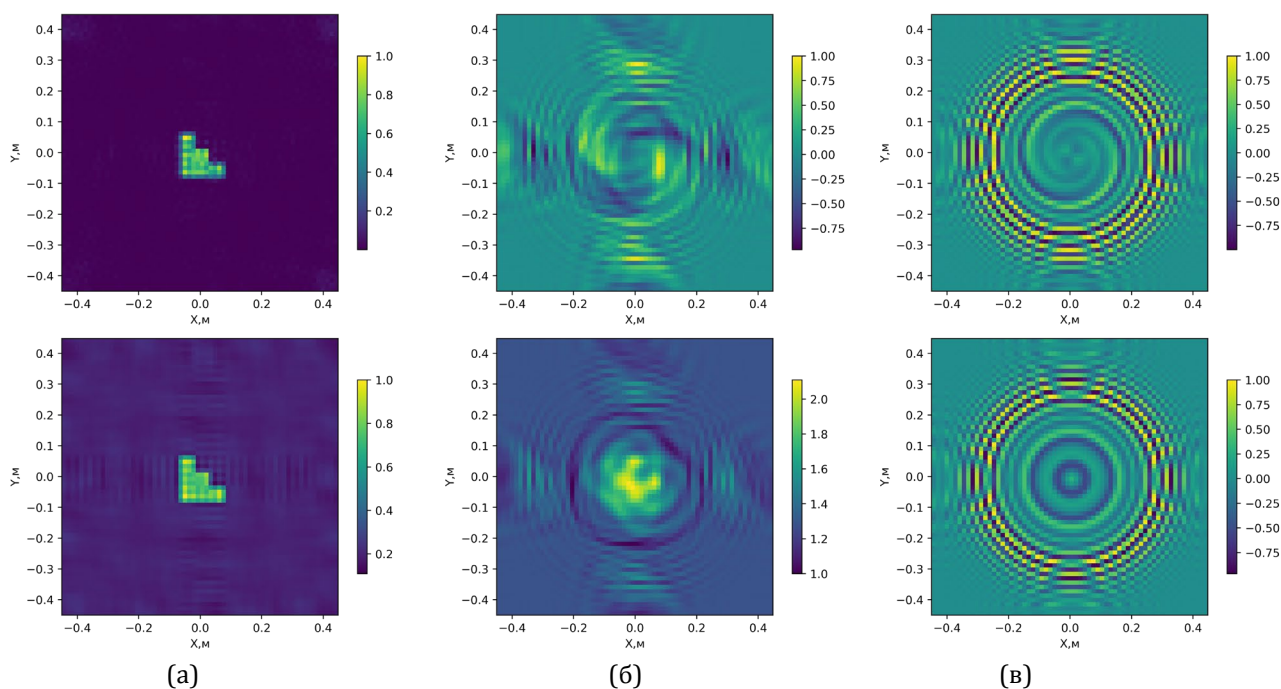


Рис. 2. Квадрат модуля восстановленного изображения объекта (а) и результаты регистрации I-й квадратуры поля, отраженного от объекта (б), от точечного источника (в). Сканирование вихревым полем с ОУМ=1 (сверху) и невихревым полем (снизу). Все изображения нормированы на максимум

Другими словами, при сканировании вихревым полем регистрируются искажения минимума интенсивности, а невихревым – искажения максимума интенсивности. На практике, вихревой подход может быть более приемлемым с точки зрения усиления/аттенюации регистрируемого сигнала, благодаря уменьшению рабочей точки по амплитуде. Кроме того, предложенный метод позволяет нивелировать паразитные отражения от бесконечных (относительно области сканирования) плоскостей, расположенных перед сканируемым объектом. Так как плоскость не вносит искажения в минимум интенсивности.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности восстановления формы и позиции объекта, по результатам моностатического сканирования квадратур вихревого поля отраженного от объекта зондирования. Дальнейшие исследования направлены на реализацию натурального эксперимента.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0014.

В. Е. Митрохин, А. С. Наумов, П. Г. Попенко

Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Российская Федерация

СТОЙКОСТЬ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ В ЗИМНИХ И ЛЕТНИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПОЛИГОНЕ

Аннотация. Электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры и защита от внешних электромагнитных воздействий телекоммуникационного оборудования в настоящее время становится всё более значимой задачей. Одним из способов ее решения является экранирование. Проводимые в этом направлении исследования позволяют оценить эффективность применяемых видов экранирования и найти пути по совершенствованию способов защиты телекоммуникационного оборудования от внешних электромагнитных воздействий.

Ключевые слова: телекоммуникационные сети, заземляющее устройство, экранирование, электромагнитная совместимость, сопротивление заземления.

Для цитирования: Митрохин В. Е., Наумов А. С., Попенко П. Г. Стойкость систем радиосвязи к электромагнитным воздействиям в зимних и летних условиях эксплуатации на полигоне // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 53–55.

V. E. Mitrokhin, A. S. Naumov, P. G. Popenko

Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation

RESISTANCE OF RADIO COMMUNICATION SYSTEMS TO ELECTROMAGNETIC INFLUENCES IN WINTER AND SUMMER OPERATING CONDITIONS AT THE TEST SITE

Abstract. Electromagnetic compatibility of electronic equipment and protection of telecommunications equipment from external electromagnetic influences are currently becoming an increasingly important issue. Shielding is one solution. Research conducted in this area allows us to evaluate the effectiveness of current shielding methods and identify ways to improve protection of telecommunications equipment from external electromagnetic influences.

Keywords: telecommunication networks, grounding device, shielding, electromagnetic compatibility, grounding resistance.

For citation: Mitrokhin V. E., Naumov A. S., Popenko P. G. Resistance of radio communication systems to electromagnetic influences in winter and summer operating conditions at the test site // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 53–55.

Современное телекоммуникационное оборудование имеет разнообразные технические приспособления для защиты от внешних дестабилизирующих факторов, в частности от индуктивных и кондуктивных помех. Одним из таких приспособлений является экранирование. Ранее были экспериментально исследованы экранирующие свойства корпуса специальной техники в диапазоне низких частот и импульсном режиме на полигоне в зимних условиях эксплуатации. Полученный коэффициент экранирования с учётом погрешностей составил $\sim 0,5$ вне зависимости от частоты. Исследования проводились без использования заземляющих устройств.

При использовании экранов с заземляющими устройствами эффективность экранирования должна значительно возрасти. Для оценки коэффициента экранирования с использованием заземляющих устройств была создана математическая модель экрана. По результатам моделирования была получена частотная зависимость коэффициента экранирования (рис. 1).

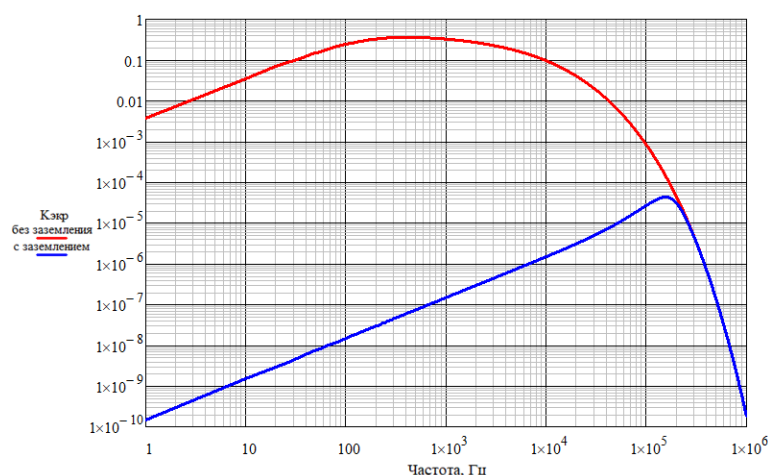


Рис. 1. Частотная зависимость коэффициента экранирования

Как видно, данные модели в низкочастотном диапазоне без заземления отличаются от полученных экспериментальных данных. Это объясняется тем, что листы, составляющие экран объекта исследования, не имели электрического контакта, поэтому такой экран нельзя считать сплошным из-за отсутствия так называемой электромагнитной герметичности. Такой экран следует рассматривать как набор отдельных экранирующих листов. Но даже если обеспечить электромагнитную герметичность такого экрана эффект экранирования на низких частотах без заземления оставляет желать лучшего.

Ситуация кардинально меняется если к такому экрану подключить заземляющее устройство.

Однако сопротивление заземляющего устройства в различных климатических условиях различно и меняется в течении года.

Для прогнозирования изменения коэффициента экранирования от величины сопротивления заземления заземляющего устройства добавим в модель изменение сопротивления заземления (рис. 2а) на семействе фиксированных частот.

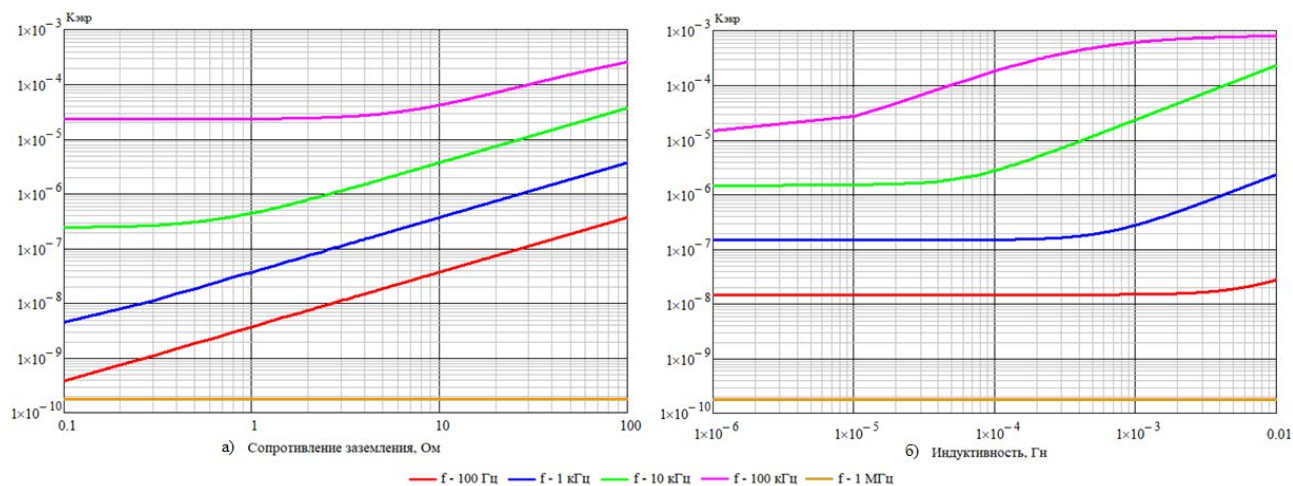


Рис. 2. Зависимость коэффициента экранирования от параметров заземлителя

Как видно, в диапазоне низких частот величина сопротивления заземления играет значительную роль за счёт поглощения энергии электромагнитных волн экраном и отвода её в землю. В диапазоне высоких частот влияние заземляющего устройства практически отсутствует, так как в большей степени начинает действовать эффект отражения электромагнитных волн экраном.

Однако заземляющее устройство обладает не только параметром сопротивления, но и параметром индуктивности. Рассмотрим, как влияет индуктивность заземляющего устройства на коэффициент экранирования при фиксированном сопротивлении (рис. 16).

Очевидно, что с увеличением индуктивности эффективность экрана снижается и с увеличением частоты снижение эффективности более выражено, но до начала действия эффекта отражения.

Из вышеизложенного можно сделать следующий вывод: для надёжного экранирования оборудования телекоммуникационных систем, помимо обеспечения электромагнитной герметичности, необходимо контролировать состояние заземляющего устройства, так как эффективность экрана на низких частотах зависит не столько от размеров экрана и материала, из которого он изготовлен, сколько от величин сопротивления и индуктивности заземляющего устройства.

В настоящее время на полигоне проводится непрерывный дистанционный мониторинг состояния сопротивления заземляющего устройства. Собирается статистика изменения сопротивления заземления от изменения температуры грунта в течение календарного года для оценки влияния на эффективность экранирующих свойств экрана специальной техники.

И. В. Скрипник

ООО «Научно-производственное предприятие «ПРИМА»,
Нижний Новгород, Российская Федерация

ЭТАПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТИ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Аннотация. Обеспечение интероперабельности является необходимым условием для повышения эффективности применения и дальнейшего развития беспилотной авиации. Методика обеспечения интероперабельности, представленная в ГОСТ Р 55062-2021, развивается применительно к беспилотным авиационным системам.

Ключевые слова: интероперабельность, беспилотная авиационная система, система радиосвязи, сетевое взаимодействие.

Для цитирования: Скрипник И. В. Этапы обеспечения интероперабельности беспилотных авиационных систем // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 56–59.

I. V. Skripnik

PRIMA Research & Production Enterprise, LLC, Nizhny Novgorod, Russian Federation

STAGES OF ENSURING INTEROPERABILITY OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS

Abstract. Ensuring interoperability is a prerequisite for increasing the efficiency of application and further development of unmanned aircraft. The methodology for ensuring interoperability, presented in GOST R 55062-2021, is being developed in relation to unmanned aircraft systems.

Keywords: interoperability, unmanned aircraft system, radio communications system, shared communications.

For citation: Skripnik I. V. Stages of ensuring interoperability of unmanned aircraft systems // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 56–59.

В настоящее время во всем мире и в Российской Федерации активно развивается область беспилотной авиации. В процессе выполнения миссий беспилотные воздушные суда должны взаимодействовать с внешним пилотом и другими пилотируемыми и беспилотными летательными аппаратами. При этом многочисленными разработчиками средств связи и систем управления для беспилотных авиационных систем предложен ряд различных, зачастую несовместимых технических решений.

В связи с отсутствием в настоящее время единого общепризнанного стека телекоммуникационных протоколов, стандартов информационного взаимодействия и управления, формирование единого информационно-телекоммуникационного пространства для беспилотных авиационных систем представляет собой сложную и актуальную научно-техническую и организационно-методическую проблему.

Важным условием при создании единого информационно-телекоммуникационного пространства является обеспечение интероперабельности, которая определена в ГОСТ Р 59796 – 2021 и ГОСТ Р 55062 – 2021 как способность двух или более информационных систем или компонентов к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена.

Следует отметить, что в дорожной карте беспилотных систем Министерства обо-

роны США интероперабельность входит в число четырех основных направлений совершенствования беспилотных систем наряду с автономностью, сетевой безопасностью и человеко-машинным взаимодействием.

Последовательность этапов обеспечения интероперабельности, предусмотренная в ГОСТ Р 55062 – 2021, уточнена в работе применительно к беспилотным авиационным системам и включает: разработку концепции интероперабельности и терминологии, разработку архитектуры, разработку проблемно-ориентированной модели интероперабельности, планирование и разработку необходимых стандартов, формирование и реализацию профиля интероперабельности, аттестационное тестирование.

Концепция интероперабельности беспилотных авиационных систем должна представлять собой нормативный документ, отражающий все основные аспекты обеспечения внутренней и внешней интероперабельности, учитывая условия внешней среды, применительно к области беспилотной авиации.

Архитектура беспилотной авиационной системы наряду с составом включает описание функций и сервисов, предоставляемых различными подсистемами и элементами, видов и характеристик применяемых интерфейсов, описываемых протоколами технического сопряжения, а также логик взаимодействия, описываемых протоколами информационно-логического взаимодействия. При этом рассматриваются взаимодействия между подсистемами и элементами внутри беспилотной авиационной системы, с внешними объектами, а также между различными беспилотными авиационными системами.

В соответствии с ГОСТ Р 59519 – 2021 беспилотная авиационная система включает одно или несколько беспилотных воздушных судов, станцию внешнего пилота, систему связи, обеспечивающую информационное взаимодействие для абонентов беспилотной авиационной системы, а также может включать средства наземного обслуживания, средства интеграции с внешними системами и другие компоненты в зависимости от эксплуатационной категории и решаемых задач.

Для выполнения задач по назначению компоненты беспилотной авиационной системы оснащаются различными типами радиоэлектронного оборудования. Согласно документу «Требования к оснащению пилотируемых воздушных судов и беспилотных авиационных систем ...» (утвержден Постановлением Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2024 г. № 1701) беспилотные авиационные системы должны быть оснащены: оборудованием связи, оборудованием навигации, оборудованием наблюдения, оборудованием автоматического предотвращения столкновений, оборудованием удаленной идентификации, оборудованием линий управления беспилотными авиационными системами и контроля беспилотных авиационных систем, средствами криптографической защиты информации и другими средствами в зависимости от максимальной взлетной массы и характеристик полетов беспилотных воздушных судов.

Функционирование беспилотных авиационных систем требует различных видов информационного взаимодействия, включая:

- передачу команд управления на беспилотное воздушное судно,
- передачу телеметрии от комплекса бортового оборудования беспилотного воздушного судна,
- передачу видеоинформации и другой информации от целевых нагрузок беспилотного воздушного судна,
- сетевое взаимодействие в режиме обмена данными между абонентами беспилотной авиационной системы,
- речевую связь внешнего пилота и диспетчера системы управления воздушным движением.

Для реализации указанных функций в системе радиосвязи выделяются соответствующие подсистемы. Так командная радиолиния обеспечивает двусторонний обмен с

передачей команд управления от внешнего пилота и получением квитанций о доставке и выполнении.

Передача видеоинформации, а в общем случае информации от целевых нагрузок беспилотных воздушных судов, осуществляется по высокоскоростным радиопередачам, как правило реализуемым в сантиметровом диапазоне длин волн.

При выполнении миссий с одновременным использованием нескольких беспилотных воздушных судов необходимым условием становится обеспечение надежного сетевого взаимодействия. Кроме того, сеть радиосвязи обеспечивает функционирование ряда служб, включая службы обнаружения, уведомления о местоположении беспилотных воздушных судов, оповещения о препятствиях и чрезвычайных ситуациях, определения местоположения, автоматической посадки. Кроме того, в случае временного отказа командной радиопередачи сеть радиосвязи позволяет передавать команды управления от внешнего пилота и дистанционно управлять целевыми нагрузками.

Речевая связь внешнего пилота и диспетчера системы управления воздушным движением может обеспечиваться средствами наземной связи в случае стационарного размещения станции внешнего пилота. В общем случае возможна организация речевого обмена между внешним пилотом и диспетчером посредством формирования составного канала через беспилотное воздушное судно, обеспечивающее ретрансляцию сообщений.

Предложен вариант проблемно-ориентированной модели интероперабельности беспилотных авиационных систем, полученный в результате детализации эталонной модели интероперабельности на организационном, семантическом и техническом уровнях. Каждый из этих уровней определяет специфические аспекты:

- организационная интероперабельность – согласованность общих целей, нормативно-правовых актов и регламентов;
- семантическая интероперабельность – способность взаимодействующих систем одинаковым образом интерпретировать смысл и использовать информацию, которой они обмениваются;
- техническая интероперабельность – совместимость на уровне технических средств, аппаратных и программных комплексов, их интерфейсов и протоколов обмена информацией, а также форматов представления информации.

На следующем этапе для выявленных объектов стандартизации разрабатываются необходимые национальные стандарты и формируется профиль интероперабельности, представляющий собой согласованный набор стандартов, структурированный в терминах модели интероперабельности. Для формирования профиля интероперабельности выполнен обзор существующих национальных и зарубежных стандартов, учитывая, что за рубежом проблеме интероперабельности уделяется пристальное внимание.

Реализация профиля интероперабельности беспилотных авиационных систем должна быть согласована со Стратегией развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года и с национальным проектом «Беспилотные авиационные системы».

При создании перспективных средств связи и автоматизированного управления для беспилотных авиационных систем, обеспечивающих интероперабельность целесообразно основываться на существующих системно-технических решениях и накопленном опыте создания авионики и средств радиосвязи. Вместе с тем, имеет место необходимость применения либо создания инструментальных средств, предназначенных для автоматизации разработки, моделирования и тестирования различных аспектов интероперабельности.

Заключительным этапом обеспечения интероперабельности беспилотных авиационных систем является аттестационное тестирование интероперабельности, включающее, в частности, процедуры сертификации.

Сбор и последующая статистическая обработка данных моделирования, тестирования, испытаний и мониторинга беспилотных авиационных систем позволит верифицировать используемые модели, повысить точность оценок и оперативно выполнять действия по совершенствованию системно-технических решений для повышения степени интероперабельности.

В. Д. Черных, Г. Г. Вертоградов

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОДЕЛЬЮ IRI
МАКСИМАЛЬНО ПРИМЕНИМОЙ ЧАСТОТЫ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАКЛОННОГО ЛЧМ ЗОНДИРОВАНИЯ
НА ТРАССАХ РАЗЛИЧНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ**

Аннотация. Представлены измерения максимально наблюдаемой частоты с октября 2024 г. по январь 2025 г. и с марта по май 2025 г. на радиотрассах Кипр–Ростов-на-Дону и Алис-Спрингс–Ростов-на-Дону. Приведены погрешность прогнозирования максимально применимой частоты (МПЧ) при использовании модели IRI-2020 и распределение амплитуды на трассах в течение суток. В период максимума солнечной активности на радиотрассе Кипр–Ростов-на-Дону относительная погрешность МПЧ составляет 11%, Алис-Спрингс–Ростов-на-Дону – 15%.

Ключевые слова: максимально наблюдаемая частота, ионосферное распространение, максимально применимая частота, наклонное ЛЧМ-зондирование.

Для цитирования: Черных В. Д., Вертоградов Г. Г. Оценка погрешности прогнозирования моделью IRI максимально применимой частоты по результатам наклонного ЛЧМ зондирования на трассах различной протяженности // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 60–62.

V. D. Chernykh, G. G. Vertogradov

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

**ESTIMATION OF THE ERROR IN FORECASTING
THE MAXIMUM APPLICABLE FREQUENCY BY THE IRI MODEL
BASED ON THE RESULTS OF OBLIQUE LFM SOUNDING
ON ROUTES OF DIFFERENT LENGTHS**

Abstract. The article presents measurements of maximum observable frequency from October 2024 to January 2025 and from March to May 2025 on the Cyprus–Rostov-on-Don and Alice Springs–Rostov-on-Don radio paths. The error in predicting the maximum usable frequency (MUF) using the IRI-2020 model and the amplitude distribution on the paths during the day are given. During the period of maximum solar activity, the relative error of the MUF of the Cyprus – Rostov-on-Don radio path is 11%, and on the Alice Springs–Rostov-on-Don path it is 15%.

Keywords: maximum observable frequency, ionospheric propagation, maximum usable frequency, oblique LFM sounding.

For citation: Chernykh V. D., Vertogradov G. G. Estimation of the error in forecasting the maximum applicable frequency by the IRI model based on the results of oblique LFM sounding on routes of different lengths // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 60–62.

В настоящее время проблема прогнозирования основных параметров, характеризующих состояние ионосферы в КВ диапазоне остается актуальной в эпоху бурного развития способов связи в УКВ диапазоне. Для её решения необходимо осуществлять корректировку по эмпирически полученным данным во временном промежутке, варьиру-

ющемся от 30 мин до нескольких часов. Для получения измеренных данных используются различные методы, в частности вертикальное зондирование (ВЗ), наклонное зондирование (НЗ), возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ). Наибольшую популярность завоевал метод ВЗ в виду своей простоты из недостатков следует отметить достаточно высокую мощность излучения от 1 кВт и более. Дальнейшее развитие данной технологии привело к использованию ЛЧМ-зондированию в широком диапазоне частот и с меньшей излучаемой мощностью, как недостаток можно отметить повышенные требования к обработке сигналов.

Целью работы является оценка погрешности, прогнозируемой МПЧ с помощью модели IRI-2020 относительно значений максимально наблюдаемой частоты (МНЧ), полученных в ходе эксперимента, и моделирование суточных вариаций амплитудного распределения сигналов на трассе зондирования.

Для получения эмпирических данных были проведены измерения на двух радиотрассах Кипр–Ростов-на-Дону и Алис-Спрингс–Ростов-на-Дону. Передатчик на Кипре располагается по координатам (35.1°N, 33.9°E), Алис-Спрингс (22.967°S, 134.448°W), приёмник (47.2°N, 39.6°E) Оба передатчика работают в режиме ЛЧМ для передатчика находящегося в Кипре скорость перестройки частоты составляет 100 кГц/с, Алис-Спрингс 125 кГц/с. Измерения проводились круглосуточно. На трассе Алис-Спрингс использовалась временная синхронизация по PPS метке. Приёмник работал в следующей конфигурации: На входе SDR приемника установлен двухпортовый коммутатор, который управляется с персонального компьютера. Один из портов нагружен на согласованную нагрузку 50 Ом, другой подключен к приемной антенне. В виду особых условий приема в период с 20 UT по 04 UT из-за воздействия внешних помех и уменьшения амплитуды поля в зоне приема по условиям распространения, в данном промежутке времени эмпирические данные отсутствуют. Графическое представление прогнозируемого значения моделью IRI-2020 МПЧ и измеренные МНЧ представлены на рис. 1.

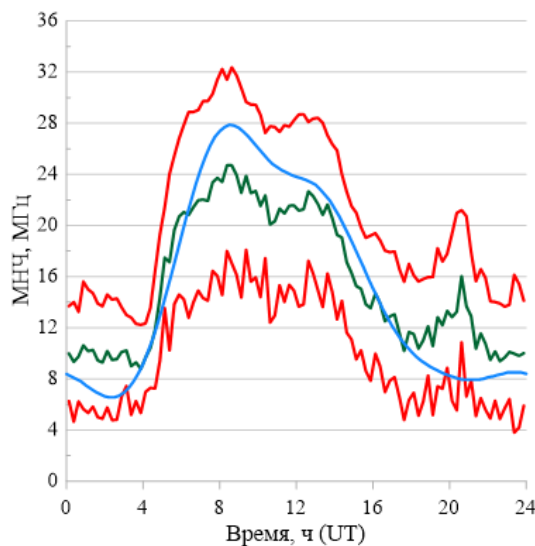


Рис. 1. Зависимость среднемесячных МНЧ на трассе Кипр–Ростов-на-Дону, декабрь 2024 г.:
 зелёная линия – усредненные значения МНЧ за месяц,
 красные линии – среднеквадратичное отклонение от МНЧ,
 синяя линия – прогнозируемые значения моделью IRI-2020 МПЧ

Помимо измерений МНЧ, было смоделировано с использованием модели IRI-2020 амплитудное распределение на трассах в течении суток, которые представлены на рис. 2.

Анализируя полученные данные, можно отметить, что использование модели IRI

для прогнозирования среднемесячных значений МПЧ на трассе средней протяженности приводит к среднеквадратичной погрешности на радиотрассе Кипр–Ростов-на-Дону ~ 3 МГц и относительной погрешности 11%, а на радиотрассе Алис-Спрингс–Ростов-на-Дону соответственно 12 МГц и 15%.

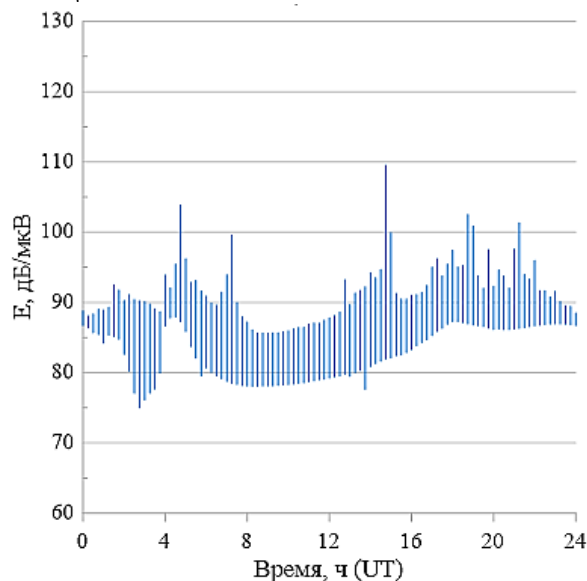


Рис. 2. Суточные изменения амплитуды поля в зоне приема на трассе Кипр–Ростов-на-Дону, декабрь 2024 г.

В заключение можно отметить основные результаты данной работы. В условиях максимальной солнечной активности использование модели IRI для решения задач прогнозирования МПЧ как на трассах средней, так и на трассах большой протяженности обеспечивает приемлемые результаты, отличающиеся от среднемесячных значений не более чем на СКО, связанное с суточными вариациями МНЧ.

Использование модели IRI для прогнозирования среднемесячных значений МПЧ на радиотрассе средней протяженности Кипр–Ростов-на-Дону приводит к среднеквадратичной погрешности ~ 3 МГц и относительной погрешности 11%. На радиотрассе большой протяженности Элис-Спрингс–Ростов-на-Дону погрешности несколько возрастают, соответственно среднеквадратичная погрешность составляет 12 МГц, а средняя относительная ошибка не превышает 15%.

Л. В. Шагарова, А. С. Яценко

Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В РЕШЕНИИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ РАДИОСВЯЗИ: ОБЗОР И ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация. Приведён обзор характеристик космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Определены направления применения данных, полученных ресурсными спутниками, при решении практических задач радиосвязи. Озвучены выводы о перспективах применения дистанционных данных при оценке характеристик радиолиний связи.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиосвязь.

Для цитирования: Шагарова Л. В., Яценко А. С. Технологии дистанционного зондирования Земли в решении практических задач радиосвязи: обзор и перспективы // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 63–65.

L. V. Shagarova, A. S. Yashchenko

Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

EARTH REMOTE SENSING TECHNOLOGIES IN PRACTICAL RADIO COMMUNICATIONS PROBLEMS: REVIEW AND PROSPECTS

Abstract. The article provides an overview of the characteristics of Earth remote sensing spacecraft. The authors consider the application of data obtained by resource satellites in solving practical radio communication problems. Conclusions are presented on the prospects for using remote data in assessing the characteristics of radio communication lines.

Keywords: remote sensing, radio communication.

For citation: Shagarova L. V., Yashchenko A. S. Earth remote sensing technologies in practical radio communications problems: review and prospects // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 63–65.

В современном мире технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) играют ключевую роль во многих направлениях науки и техники. Данные, полученные космическими аппаратами дистанционного зондирования, находят широкое применение при решении задач метеорологии, климатологии, экологии, картографии и т.д. В следствие конкуренции на рынке космических услуг существенно снизилась как стоимость запуска космического аппарата, так и затраты на его эксплуатацию. В настоящий момент на орбите функционируют сотни космических аппаратов, запущенных в рамках программ мониторинга поверхности суши, Мирового океана, атмосферы и околоземного пространства.

Согласно общепринятой классификации технологии ДЗЗ можно разделить на пассивные оптические, активные радиолокационные и пассивные радиометрические. Физической основой любого из методов ДЗЗ является известная взаимосвязь между параметрами регистрируемого сигнала и характеристиками объекта мониторинга. Так, мониторинг состояния растительности осуществляется посредством измерения контраста

отражательных характеристик в красном и ближнем инфракрасном диапазонах количественно измеряемого в значения индекса NDVI, который в свою очередь коррелирует с влагосодержанием листьев.

Согласно теории и практики радиосвязи в процессе мониторинга Земли как планеты исследуются среда распространения радиоволн (атмосфера), а также объекты с которыми взаимодействуют радиоволны в процессе распространения (ионосфера, поверхность суши и водоёмов, лесные массивы). По этой причине технологии ДЗЗ могут найти применение при оценке характеристик радиолиний связи. Приведём характеристики и область применения данных некоторых космических аппаратов ДЗЗ.

Исследования состояния ионосферы

В настоящее время на орбите функционирует группировка из 4-х отечественных спутников Ионосфера-М, запущенных в рамках программы мониторинга гелиогеофизической обстановки «Ионозонд». В перечень полезной нагрузки спутников «Ионосфера-М» входят:

- низкочастотный Волновой Комплекс (НВК2) – измеряет характеристики электрических и магнитных полей в диапазоне частот 0 кГц - 20 кГц;
- двухчастотный передатчик МАЯК – предназначен для радиопросвечивания ионосферы на частотах 150 и 400 МГц;
- ионосферный радиолокатор ЛАЭРТ – измеряет вертикальное распределение электронной концентрации ионосферной плазмы методом резонансного отражения в радиодиапазоне 100 кГц - 20 МГц. в диапазоне частот 100 кГц – 20 МГц. В активном режиме ЛАЭРТ функционирует как ионосферный локатор, а в пассивном как радиоспектрометр.

В перспективе в рамках программы Ионозонд-2025 планируется запуск спутника Зонд-М, предназначенного для мониторинга состояния Солнца. В рамках программы «Ионозонд» будет осуществляться контроль пространственно-временной структуры ионосферы, естественных и искусственных неоднородностей, а также пространственного распределения электронной концентрации и электромагнитных полей.

Оценка радиофизических характеристик подстилающей поверхности.

В общем случае под подстилающей поверхностью понимают любой объект или структуру с которыми взаимодействуют электромагнитные волны в процессе излучения или распространения; при прогнозировании распространения земных волн такими объектами являются поверхностный слой грунта или водоёма.

Оперативная оценка комплексной диэлектрической проницаемости грунта и водной поверхности в региональных и глобальных масштабах возможно с привлечением технологии спутниковой микроволновой радиометрии. На данный момент на орбите функционируют два аппарата, позволяющие производить дистанционную оценку комплексной диэлектрической подстилающей поверхности в дециметровом диапазоне волн: SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity, Европейского космического агентства) и SMAP (Soil Moisture Active Passive, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства). Аппараты несут на борту микроволновый радиометр L-диапазона на частоту 1,4 ГГц. Данные о солёности водной поверхности можно использовать напрямую без каких-либо дополнительных преобразований. Технологии спутниковой радиометрии позволяют производить оценку влажности (и диэлектрическую проницаемости с ней связанную) почв в слое толщиной до 5 см. По этой причине эти данные могут быть использованы как один из входных параметров моделей испарения и влагопереноса. В результате численного моделирования удаётся произвести оценку профиля влажности в пределах деятельного слоя почв, что позволяет произвести определить радиофизические характеристики подстилающей поверхности в диапазоне средних и коротких волн.

Оценка состояния атмосферы

Состояние атмосферы оказывает наибольшее влияние на процессы распространения радиоволн в диапазоне от дециметровых волн до субмиллиметровых волн. Современные космические аппараты, предназначенные для мониторинга атмосферы, позволяют не только идентифицировать облака с помощью оптических сенсоров, но и определить плотность облачного слоя по данным радиометров и радиолокаторов миллиметрового диапазона. Кроме того, данные, полученные современными оптико-электронными сенсорами, позволяют идентифицировать атмосферные аэрозоли. При наличии электродинамической модели, устанавливающей взаимосвязь между плотностью облачного слоя или атмосферных аэрозолей и его радиофизическими характеристиками, удастся прогнозировать затухающие свойства атмосферы, что в свою очередь найдёт применение при решении практических задач тропосферной связи.

Среди обилия космических аппаратов, позволяющих осуществлять мониторинг атмосферы, можно выделить: спутники Terra и Aqua с оптико-сенсором MODIS на борту, функционирующим на орбите с 2001 года; CALIPSO осуществляющий лидарное вертикальное профилирование аэрозолей и облаков и радиолокационную съёмку в миллиметровом диапазоне с 2006 года; космические аппараты, запущенные в рамках программы глобального мониторинга Sentinel. С полным перечнем аппаратов, запущенных в рамках мониторинга состояния атмосферы, можно ознакомиться на ресурсе, курируемом Всемирной метеорологической организации <https://space.oscar.wmo.int/satellites>.

Оценка состояния растительного слоя

Растительность представляет собой случайно-неоднородную среду, которая, в зависимости от видовой принадлежности, оказывает заметное влияние на процессы распространения радиоволн в диапазоне от метровых до миллиметровых волн. Известные на данный момент электродинамические модели растительности, рекомендованные Международным союзом электросвязи, базируются на эмпирических данных, полученных в пределах определённого территориально-природного комплекса. Кроме того, в этих моделях редко учитываются сезонные вариации поглощающих свойств растительности.

Поглощательные характеристики растительного слоя в радиодиапазоне определяются содержанием влаги в листве, стеблях и/или стволах деревьев. При этом данные, полученные оптическими сенсорами, позволяют производить оценку состояния растительности, определяемую влажностью. Это позволяет использовать данные, полученные спутниковыми оптико-электронными сенсорами, при мониторинге радиофизических характеристик объектов окружающей среды. Однако на данный момент модели, устанавливающие взаимосвязь между характеристиками объекта в оптическом и радиодиапазоне не созданы.

Численная группировка космических аппаратов, запущенных в рамках программ мониторинга растительности, включает сотни спутников. Среди них можно выделить аппараты миссии Landsat. На данный момент на орбите функционируют спутники Landsat 7, 8 и 9. Первый из них непрерывно функционирует на орбите с 1999 г., что позволяет оценивать состояние растительности интересующего участка поверхности с использованием данных одного и того же космического аппарата на протяжении почти трёх десятилетий.

С развитием технологий дистанционного зондирования Земли расширяется область их применения. Так, данные, полученными космическими аппаратами экологического мониторинга могут найти непосредственное применение при оценке радиофизических характеристик объектов окружающей среды, с которыми взаимодействуют радиоволны в процессе распространения.

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

А. С. Яценко

Омский научный центр СО РАН (Институт радиоп физики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
СПУТНИКОВЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ
ПРИ ОЦЕНКЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН**

Аннотация. Приведены результаты сравнительного анализа излучательных и импедансных характеристик подстилающей поверхности в диапазоне дециметровых и декаметровых волн соответственно. В процессе расчёта использовались информация о вертикальном распределении влажности подстилающей поверхности, полученная в результате численного моделирования, а также данные о диэлектрической проницаемости, полученные в лабораторных условиях. Озвучены выводы о перспективах использования спутниковых радиометрических данных при оценке радиофизических характеристик подстилающей поверхности в декаметровом диапазоне волн.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, подстилающая поверхность, радиосвязь.

Для цитирования: Яценко А. С. О возможности использования спутниковых радиометрических данных при оценке радиофизических характеристик подстилающей поверхности в декаметровом диапазоне волн // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 66–68.

A. S. Yashchenko

Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

**ON THE POSSIBILITY OF USING SATELLITE RADIOMETRIC DATA
IN ASSESSING THE RADIOPHYSICAL CHARACTERISTICS
OF THE UNDERLYING SURFACE IN THE HIGH-FREQUENCY RANGE**

Abstract. The article presents the results of a comparative analysis of the emissivity and impedance characteristics of the underlying surface in the decimeter and decameter wave ranges, respectively. The calculations used information on the vertical distribution of underlying surface moisture obtained through numerical modeling, as well as permittivity data obtained in laboratory state. The satellite radiometric data can be used in assessing the radiophysical characteristics of the underlying surface in the decameter wave range.

Keywords: remote sensing, underlying surface, radio communication.

For citation: Yashchenko A. S. On the possibility of using satellite radiometric data in assessing the radiophysical characteristics of the underlying surface in the high-frequency range // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 66–68.

Спутниковая микроволновая радиометрия L-диапазона выделяется среди известных технологий дистанционного зондирования Земли, например, спутниковой радиолокации и съёмки в оптическом диапазоне, возможностью получать данные о радиофизических характеристиках поверхности почв в пределах слоя толщиной в 5 см. Физической величиной, восстанавливаемой из спутниковых радиометрических данных, является комплексная диэлектрическая проницаемость, значения которой коррелируют с объёмной влажностью

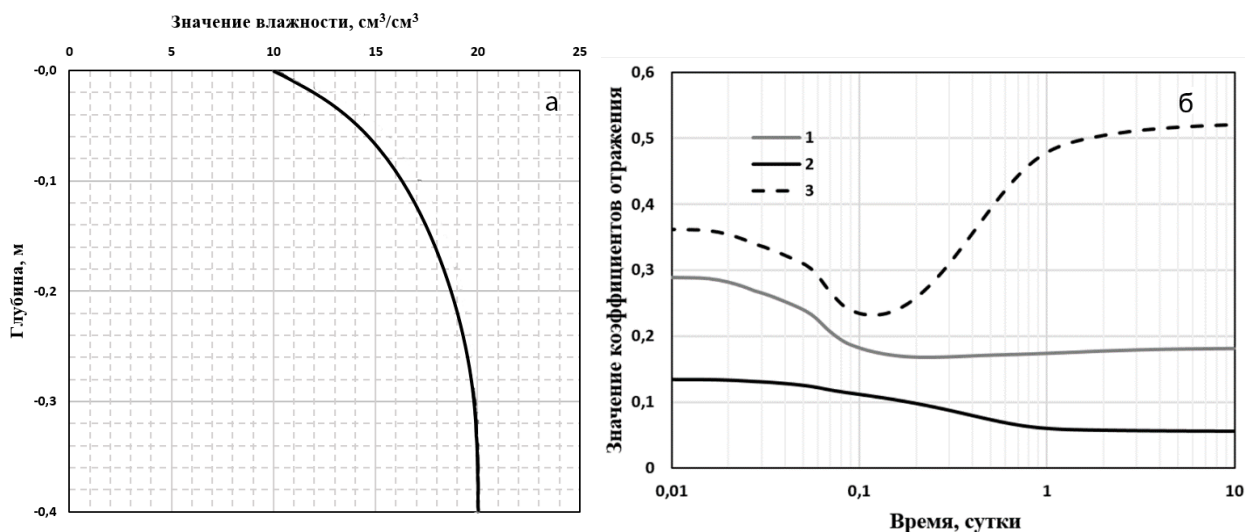
почвы. Влажность поверхностного слоя почв в текущий момент времени определяется предшествующими метеоусловиями, влагосодержанием в нижележащих слоях, а также гидрофизическими характеристиками почвы. Этот факт свидетельствует о возможности увязать четыре указанных параметра в единую модель, описывающую процесс влагопереноса в толще почвы при наличии априорных данных о подстилающей поверхности и временном ряде данных основных метеорологических параметров.

Решение задач прогнозирования характеристик радиолиний предполагает наличие априорной информации о радиофизических характеристиках объектов, с которыми взаимодействуют электромагнитные волны в процессе распространения. В случае если подобным объектом является подстилающая поверхность, то её радиофизические характеристики определяются значением диэлектрической проницаемости. В данной работе под подстилающей поверхностью понимался поверхностный слой суглинистой почвы. Известное значение комплексной диэлектрической проницаемости позволяет определить такие параметры как коэффициент отражения от поверхности, толщину скин-слоя функцию затухания и т.д. Согласно описанию подхода, приведённого в рекомендациях Международного союза электросвязи, подстилающая поверхность рассматривается в приближении однородного полубесконечного диэлектрика, что не соответствует состоянию почв и грунтов, находящихся в естественных условиях. Для оценки погрешности, обусловленной этим приближением, нами произведена оценка радиофизических характеристик подстилающей поверхности в декаметровом диапазоне волн на разных этапах испарения почвенной влаги.

Моделирование влагопереноса выполнялось с использованием гидрофизических параметров почвы, соответствующих среднетяжёлому суглинку в ходе численного решения уравнения Ричардса (модифицированного уравнения Дарси). Испарение с поверхности почвы описывалось при помощи метода Пенмана-Монтейта (FAO-56). Временной ряд метеопараметров был взят из архива Всемирной метеорологической организации для метеостанции №28786, расположенной вблизи рабочего посёлка Полтавка Омской области 2024 г. В исходном состоянии подстилающая поверхность рассматривалась как однородно увлажнённая среда со значением объёмной влажности в 20 процентов. Пересчёт значений влажности в комплексную диэлектрическую проницаемость осуществлялся с помощью диэлько-влажностных зависимостей, полученных в лабораторных условиях для образца суглинки, отобранного на юго-западе Омской области. В процессе лабораторных измерений определялся вид диэлектрических спектров в диапазоне частот от 1 МГц до 4 ГГц при значениях влажности в диапазоне от максимальной гигроскопичности до полной влагоёмкости. По мере изменения профиля влажности, полученного в ходе моделирования, производился расчёт отражательных характеристик поверхности в диапазоне декаметровых и дециметровых волн, и импедансных характеристик в декаметровом диапазоне. Характерный вид профиля влажности, полученный в результате итерационного решения уравнения Ричардсона по истечении модельного времени в 10 суток, приведён на рис. а. Временной ряд отражательных характеристик, рассчитанный для частоты 1,4 ГГц показан на рис. б.

Анализ полученных результатов показал, что при начальной влажности существенно меньшей максимальной полевой влагоёмкости (менее 35 процентов) временной ряд данных о коэффициенте отражения мало изменяется по прошествии модельного времени более 1 суток. При больших начальных значениях влажности изменения временных рядов данных коэффициента отражения наблюдаются на протяжении 2-х и более суток. Это свидетельствует о том, что оценка вида профиля влажности только по данным радиометров дециметрового диапазона волн возможна лишь при резком изменении диэлектрических характеристик в пределах глубины зондирования радиометра.

В противном случае данные радиометров могут быть использованы как дополнительный источник информации о состоянии поверхностного слоя при моделировании влагопереноса.



Характерный вид профиля влажности, полученный в результате моделирования (а), и временной ряд данных коэффициентов отражения (б):
1 – горизонтальная поляризация, 2 – вертикальная поляризациях,
3 – нормированная разница коэффициентов отражения

Полученные результаты свидетельствуют о возможности нахождения корреляционной зависимости между отражательными характеристиками подстилающей поверхности на частоте 1,4 ГГц и видом профиля влажности при условии наличия заметного градиента влагосодержания. В случае отсутствия такого градиента, радиометрические данные могут быть использованы только как источник информации о влажности поверхностного слоя почв толщиной до 5 см, а сам профиль может быть восстановлен только в результате моделирования влагопереноса при наличии априорной информации о состоянии окружающей среды. Полученные результаты могут найти применение при дистанционной оценке радиофизических характеристик подстилающей поверхности в дециметровом диапазоне волн.

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

АНТЕННО-ПРИЕМНЫЕ И АНТЕННО-ПЕРЕДАЮЩИЕ СИСТЕМЫ,
РАДИОСРЕДСТВА, ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ ПЛАТФОРМЫ,
ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

ANTENNA-RECEIVING AND ANTENNA-TRANSMITTING SYSTEMS,
RADIO EQUIPMENT, SOFTWARE AND HARDWARE PLATFORMS,
SIGNAL PROCESSING

Н. Е. Агарков^{1,2}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

**АНАЛИЗ АКТИВНОЙ ЧАСТИ ИМПЕДАНСА
СОГЛАСУЮЩЕЙ ЦЕПИ В РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОМБИНАЦИЯХ ИНДУКТИВНЫХ ЗВЕНЬЕВ**

Аннотация. Величина вносимых потерь антенных согласующих устройств является одной из важнейших характеристик и зависит от множества паразитных параметров согласующей цепи. С целью реализации системного подхода к изучению характеристик антенных согласующих устройств при укорочении коротковолновых антенн электрического типа представлен способ измерения активной части импеданса индуктивных звеньев и их комбинаций в составе согласующей цепи при уменьшении емкости нагрузки.

Ключевые слова: антенное согласующее устройство, укороченная антенна, индуктивное звено, импеданс цепи, КВ-диапазон, паразитные параметры.

Для цитирования: Агарков Н. Е. Анализ активной части импеданса согласующей цепи в режиме холостого хода при различных комбинациях индуктивных звеньев // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 69–72.

N. E. Agarkov^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

**ANALYSIS OF THE ACTIVE PART OF THE IMPEDANCE OF THE MATCHING CIRCUIT
IN NO-LOAD MODE WITH VARIOUS COMBINATIONS OF INDUCTIVE LINKS**

Abstract. The magnitude of insertion losses (or efficiency) of antenna matching devices is one of their most important characteristics which depends on many parasitic parameters of the matching circuit elements. In order to implement a systematic approach to studying the characteristics of antenna matching devices when shortening electric-type antennas, the paper presents a method for measuring the active part of the impedance of inductive links and their combinations in the matching circuit when reducing the load capacitance.

Keywords: antenna matching device, shortened antenna, inductive link, circuit impedance, HF range, parasitic parameters.

For citation: Agarkov N. E. Analysis of the active part of the impedance of the matching circuit in no-load mode with various combinations of inductive links // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 69–72.

В коротковолновых радиостанциях малой мощности (до 50-200 Вт) в настоящее время широко применяются укороченные тонкопроволочные антенны (штыревые (от АШ-1,5 и АШ-2,4 до АШ-10), антенны «Наклонный луч» с длиной плеча от 6 до 16 м, антенны «Вертикальный полуромб» с половинной длиной плеча от 6 до 12 м, различные вариации дипольных антенн с сопоставимыми длинами плеч). На практике конструктивные емкости используемых антенн электрического типа лежат в пределах от 20-30 пФ (АШ-1,5, АШ-2,4) до 100-150 пФ (антенны с длиной плеча 20-30 м). При работе систем «Приземная укороченная антенна – антенное согласующее устройство (АнСУ)» на частотах ниже 6-8 МГц наблюдается дополнительное (непрогнозируемое) ухудшение их эффективности, достигающее 3-10 дБ. При этом режимы работы малогабаритных (носимых/мобильных) радиостанций в части обеспечения необходимого отношения сигнал/шум зачастую не отличаются от радиостанций большей мощности с более эффективными антеннами, которые эксплуатируются в рамках одного комплекса связи. Отсутствие запаса выходной мощности малогабаритных радиостанций в этом случае приводит к ухудшению качества радиосвязи, значительно снижая возможности использования данных радиосредств.

Проведённый системный анализ взаимодействия приземных укороченных антенн с АнСУ на основе дискретно коммутируемых звеньев с сосредоточенными параметрами позволил выявить ряд паразитных параметров согласующей цепи, из-за которых и происходит дополнительное ухудшение эффективности систем. Одним из основных паразитных параметров является емкость между прямым и обратным проводником цепи, которая не только шунтирует импеданс антенны, но и вносит свой вклад в согласуемое активное сопротивление согласно величине $\text{tg} \delta$ материала печатной платы. Другим, не менее важным источником снижения КПД АнСУ, является активная часть импеданса согласующих звеньев с учетом их размещения на прямом проводнике АнСУ. Установлено, что он выступает в роли протяженного дополнительного проводника к согласующим звеньям, повышая паразитную емкость, параллельную согласующим звеньям. В контексте индуктивных звеньев (включающих в себя помимо катушки индуктивности печатные проводники и реле) влияние прямого печатного проводника согласующей цепи заключается в дополнительном увеличении активной части их импеданса.

Оценка совокупного вклада паразитных параметров согласующей цепи АнСУ в активную часть ее импеданса при согласовании антенн с различной степенью укороченности проводилась следующим образом. К выходу согласующей цепи подключались высокодобротные керамические конденсаторы различной емкости (режим холостого хода (0 пФ), а также режимы 33, 50, 70 и 110 пФ). Для каждого режима и каждой комбинации индуктивных звеньев измерялись частоты последовательного резонанса АнСУ, а также активное сопротивление согласующей цепи.

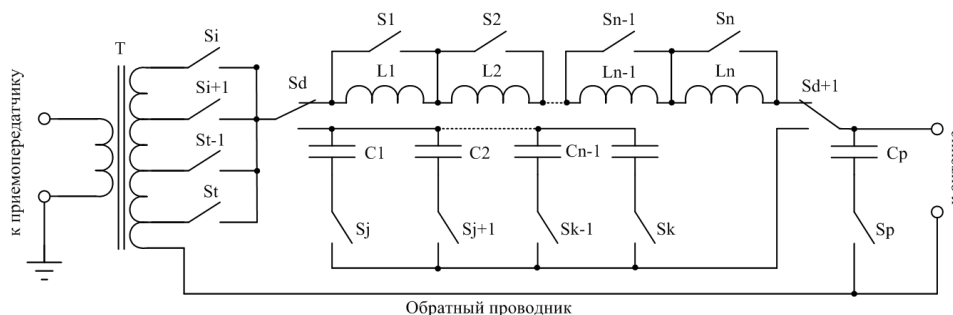


Рис. 1. Функциональная схема использованных макета и образца АнСУ

В работе использовались макет АнСУ, а также образец АнСУ, содержащие набор широкополосных трансформаторов сопротивления с переключаемым коэффициентом трансформации, а также цепь компенсации реактивной части импеданса антенны (функциональная схема

показана на рис.1). Индуктивная ветвь цепи компенсации состояла из 10 звеньев (L1-L10). Номинальные значения их индуктивности составляли ряд 25600; 12800; 6400; 3200; 1600; 800; 400; 200; 100 и 50 нГн. На рис. 2-5 отражены результаты измерения активной части импеданса комбинаций согласующих звеньев, а также кривые активной части импеданса согласующей цепи АнСУ. Комбинации звеньев имели следующие названия: 0 – включены все индуктивные звенья; 1 – включено только звено 25600 нГн; 1' – включены звенья от 12800 до 50 нГн; 2 – только 12800 нГн; 2' – включены звенья от 6400 до 50 нГн и т.д. до 7' – включены 200, 100 и 50 нГн. При комбинации 8 были отключены все индуктивные звенья.

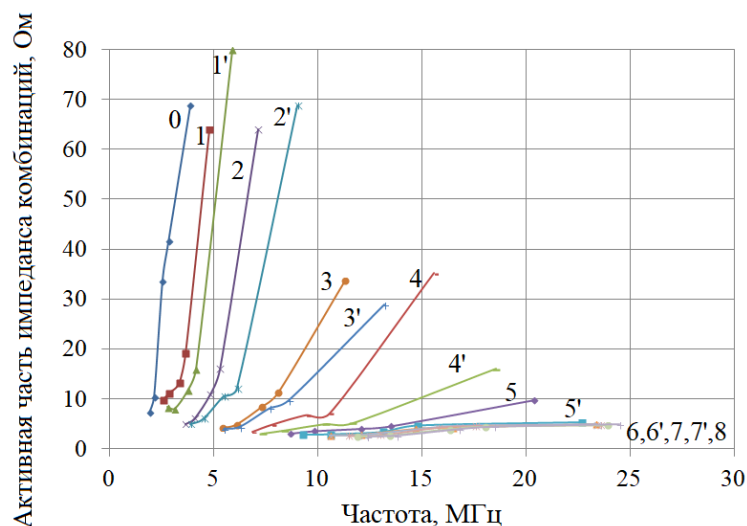


Рис. 2. Кривые активной части импеданса комбинаций индуктивных звеньев в составе макета АнСУ с учетом активного сопротивления паразитной емкости согласующей цепи

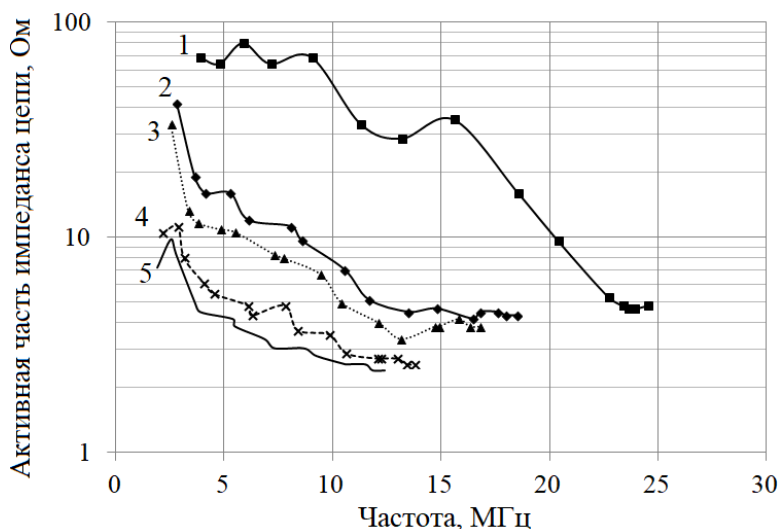


Рис. 3. Кривые активной части импеданса макета согласующей цепи при холостом ходе АнСУ (1), при подключении к выходу АнСУ высокодобротного керамического конденсатора емкостью 33 пФ (2), 50 пФ (3), 70 пФ (4) и 110 пФ (5)

Анализ рис. 2-5 показывает, что в диапазоне частот до 5-7 МГц наибольший вклад в активное сопротивление согласующей цепи вносит активная часть импеданса паразитной емкости согласующей цепи. Для макета АнСУ данная величины составляла около 33 пФ с $\text{tg}\delta \approx 0,02$, для образца – около 27 пФ с $\text{tg}\delta \approx 0,008$. В диапазоне частот до 10-15 МГц большой $\text{tg}\delta$ материала платы макета АнСУ также приводит к повышенному активному сопротивлению комбинаций согласующих звеньев относительно образца

АнСУ за счет вклада емкости прямого проводника согласующей цепи, понижающего отношение реактивной части импеданса звеньев к активной.

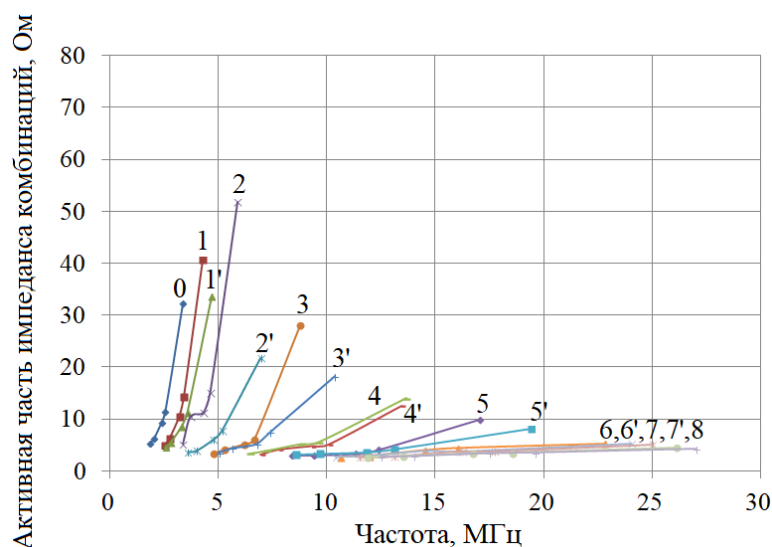


Рис. 4. Кривые активной части импеданса комбинаций индуктивных звеньев в составе образца АнСУ с учетом активного сопротивления паразитной емкости согласующей цепи

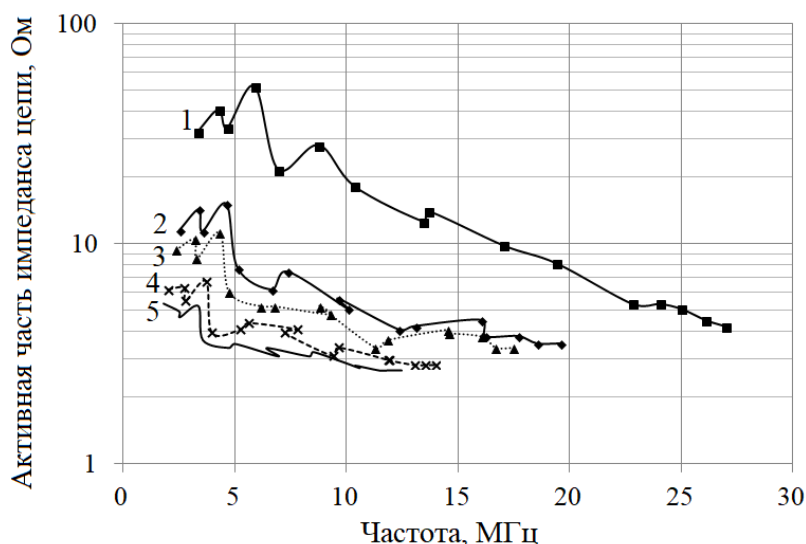


Рис. 5. Кривые активной части импеданса образца согласующей цепи при холостом ходе АнСУ (1), при подключении к выходу АнСУ высокодобротного керамического конденсатора емкостью 33 пФ (2), 50 пФ (3), 70 пФ (4) и 110 пФ (5)

Полученные частотные характеристики активной части импеданса согласующей цепи с учетом согласуемого активного сопротивления антенн АШ-2,4 (25-30 пФ), НЛ 9/6 (50-60 пФ), а также ВПР 12/6 (100-120 пФ) соответствуют результатам экспериментальных измерений величины вносимых потерь макета и образца АнСУ при согласовании данных антенн.

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

Н. Е. Агарков^{1,2}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)

Омск, Российская Федерация

СПОСОБ СОКРАЩЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ «ПОРАЖЕННЫХ» ЧАСТОТ СОГЛАСОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ПРИЗЕМНАЯ УКРОЧЕННАЯ АНТЕННА – АНТЕННОЕ СОГЛАСУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО» КВ-ДИАПАЗОНА

Аннотация. При согласовании укороченных приземных антенн КВ-диапазона с помощью антенных согласующих устройств на основе дискретно коммутируемых звеньев с сосредоточенными параметрами между некоторыми комбинациями подключенных звеньев возникают области частот, в которых система не может быть согласована. Представлены результаты оптимизации индуктивных звеньев согласующей цепи в части обеспечения непрерывности полосы согласования системы при работе с антенной АШ-2,4.

Ключевые слова: антенное согласующее устройство, укороченная антенна, приземная антенна, область согласования, «пораженные частоты», индуктивное звено, КВ-диапазон.

Для цитирования: Агарков Н. Е. Способ сокращения областей «пораженных» частот согласования системы «приземная укороченная антенна – антенное согласующее устройство» КВ-диапазона // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 73–75.

N. E. Agarkov^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

Omsk, Russian Federation

METHOD OF REDUCING THE AREAS OF “AFFECTED” MATCHING FREQUENCIES OF THE “SHORTENED ANTENNA – ANTENNA MATCHING DEVICE” SYSTEM OF THE HF RANGE

Abstract. When matching shortened ground HF antennas using antenna matching devices based on discretely switched links with concentrated parameters, frequency regions arise between certain combinations of connected links in which the system cannot be matched. The paper presents the results of optimizing the inductive links of the matching circuit in terms of ensuring the continuity of the system matching band when working with the ASH-2.4 antenna.

Keywords: antenna matching device, shortened antenna, ground antenna, matching region, “affected” frequencies, inductive section, HF range.

For citation: Agarkov N. E. Method of reducing the areas of “affected” matching frequencies of the “shortened antenna – antenna matching device” system of the HF-range // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 73–75.

Обеспечение высокой мобильности современных радиостанций КВ-диапазона малой мощности (до 50-200 Вт) сопряжено с необходимостью практического использования укороченных (относительно длины волны) тонкопроволочных антенн. Одной из самых распространенных электрически коротких антенн является антенна Куликова с длиной излучателя

2,4 м (АШ-2,4). В разных конструктивных исполнениях антенна АШ-2,4 имеет емкость в пределах 25-30 пФ, что затрудняет ее эффективное (с точки зрения величины вносимых потерь антенного согласующего устройства (АнСУ)) согласование на частотах ниже 8-10 МГц. Электрические и тепловые режимы работы индуктивных звеньев АнСУ при работе с антенной АШ-2,4 оказываются значительно тяжелее, чем при согласовании более длинных антенн, используемых в носимых радиостанциях (антенны «Наклонный луч», «Вертикальный полуромб», различные вариации штыревых и дипольных антенн). Увеличение числа согласующих звеньев в АнСУ, а также рост рабочих частот этих звеньев при укорочении антенн приводит к повышению влияния паразитных параметров прямого и обратного проводника согласующей цепи АнСУ, а также самих звеньев на эффективность системы.

По мере укорочения излучателей антенн совместно с падением КПД системы ярко проявляется другой эффект – количественно увеличиваются и расширяются области «пораженных» частот согласования системы. В пределах этих областей невозможно достичь целевого показателя согласования (КСВ) системы ни при какой комбинации согласующих звеньев, поскольку разрыв в центральных частотах согласования системы между соседними комбинациями индуктивных звеньев оказывается шире полосы согласования. Основной причиной возникновения данного эффекта является разная скорость повышения эквивалентной индуктивности звеньев с ростом частоты. Чем больше номинальная индуктивность звена, тем быстрее повышается его эквивалентная индуктивность с ростом частоты. Поэтому при переходе между двумя смежными комбинациями, первая из которых состоит из одного звена старшего разряда, а вторая из суммы всех более младших разрядов, происходит несоответствие их эквивалентных индуктивностей (образуется «пораженная» область частот с большими значениями КСВ). Несмотря на наличие в АнСУ шунтирующих конденсаторов, их включение при согласовании такой электрически короткой антенны как АШ-2,4, помогает лишь частично, а вносимые потери АнСУ при этом возрастают на 0,5-2 дБ (звенья и печатная плата АнСУ начинают перегреваться).

Для сокращения количества и ширины таких областей при работе АнСУ с антенной АШ-2,4 предлагается оптимизировать номинальные значения индуктивностей всех младших и части старших разрядов звеньев (при этом само количество индуктивных звеньев в АнСУ не увеличивается, что позволяет избежать дальнейшего роста паразитных параметров прямого и обратного проводника АнСУ).

В данной работе использовался образец АнСУ, содержащий набор широкополосных трансформаторов сопротивления с переключаемым коэффициентом трансформации, а также цепь компенсации реактивной части импеданса антенны (функциональная схема показана на рис. 1). Индуктивная ветвь цепи компенсации состояла из десяти звеньев (L1-L10). До оптимизации их номинальные значения составляли ряд 25600; 12800; 6400; 3200; 1600; 800; 400; 200; 100 и 50 нГн.

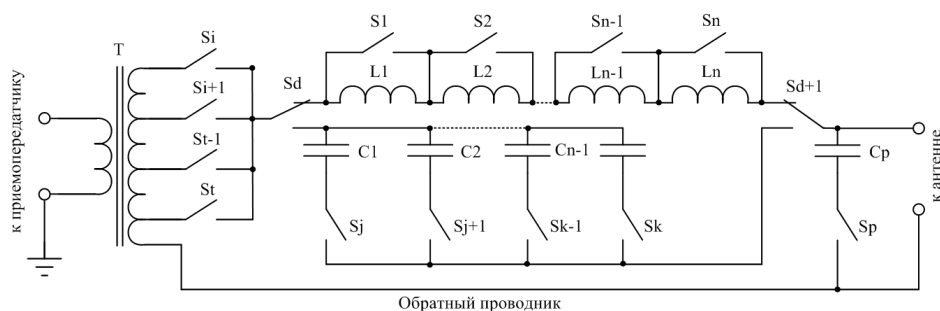


Рис. 1. Функциональная схема использованного образца АнСУ

На рис. 2 представлены измеренные характеристики режимов работы комбинаций индуктивных звеньев образца АнСУ при согласовании антенны АШ-2,4 до их оптимизации. Суммарная область «пораженных» частот согласования системы с 10 до 20 МГц по критерию $KCB < 2,5$ составляет около 2,5 МГц, что существенно ограничивает возможности использования системы в радиолиниях с автоматическим изменением рабочей частоты.

№	Комбинация звеньев	Частота настройки, МГц	KCB	Разница частот, МГц	Пересечение по KCB
3	Только 6400 нГн	6,93	1,2	0,74	>10
3'	3200+...50 нГн	7,67	1,24		
4	Только 3200 нГн	10,02	1,48	0,23	3
4'	1600+...50 нГн	10,25	1,47		
5	Только 1600 нГн	12,79	1,73	1,81	>10
5'	800+...50 нГн	14,6	1,5		
6	Только 800 нГн	17,23	1,4	1,47	6
6'	400+...50 нГн	18,7	1,3		
7	Только 400 нГн	20,29	1,12	1,14	4
7'	200+...50 нГн	21,43	1,04		

Рис. 2. Режимы работы звеньев до их оптимизации

При оптимизации номинальные значения индуктивностей младших разрядов увеличивались таким образом, чтобы общая индуктивность одного более старшего разряда всегда была меньше суммы младших (начиная с комбинации 7'). Этим компенсировалась разница в скоростях увеличения эквивалентной индуктивности звеньев. Таким способом были оптимизированы звенья L7-L10. Звено L6 (800 нГн) не изменялось, а индуктивность звена L5 (1600 нГн) была уменьшена. Старшие звенья L1-L4 не изменялись, поскольку их корректировка не позволяет уменьшить количество областей «пораженных» частот или сократить их ширину. В итоге, ряд номинальных значений индуктивностей приобрел следующий вид: 25600; 12800; 6400; 3200; 1400; 800; 510; 370; 170 и 100 нГн. На рис. 3 отражены режимы работы звеньев после оптимизации (для удобства сравнения данных на рис. 2 и 3, номинальные значения индуктивностей звеньев в столбце «Комбинация звеньев» сохранены).

№	Комбинация звеньев	Частота настройки, МГц	KCB	Разница частот, МГц	Пересечение по KCB
3	Только 6400 нГн	6,93	1,2	0,57	>10
3'	3200+...50 нГн	7,5	1,24		
4	Только 3200 нГн	10	1,1	-0,2	2
4'	1600+...50 нГн	9,8	1,15		
5	Только 1600 нГн	13,1	1,4	0,45	2,3
5'	800+...50 нГн	13,55	1,4		
6	Только 800 нГн	16,8	1,3	0,4	1,7
6'	400+...50 нГн	17,2	1,2		
7	Только 400 нГн	19,6	1,2	0,4	1,5
7'	200+... 50 нГн	20	1,2		

Рис. 3. Режимы работы звеньев после их оптимизации

Таким образом, благодаря проведенной оптимизации номинальных значений индуктивностей звеньев АнСУ, были устранены четыре области «пораженных» частот согласования системы с антенной АШ-2,4 в наиболее важном и используемом на практике диапазоне частот от 10 до 20 МГц. Проведенное исследование показало, что при работе АнСУ с антенной АШ-2,4, как самой укороченной из штатных антенн радиостанции, индуктивности младших разрядов звеньев можно увеличивать до двух раз. Минимальная индуктивность звена может составлять не 25 или 50, а 100 нГн и даже несколько больше, т.к. полосы согласования системы в диапазоне частот выше 20 МГц превышают 1-1,5 МГц. Кроме этого было установлено, что оптимизация индуктивных звеньев не повлияла на настройку более длинных антенн, где те же комбинации звеньев работают на более низких частотах. При этом величина вносимых потерь АнСУ практически не изменилась (КПД не ухудшился), поскольку увеличению индуктивности подверглись только звенья младших разрядов.

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

Ю. Б. Башкуев, А. Д. Шунков

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Российская Федерация

**ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НА ФОНЕ СЕТЕВЫХ ПОМЕХ
ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ГИДРОЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА
НА БЕРЕГУ ОЗЕРА БАЙКАЛ**

Аннотация. Представлена методика регистрации и цифровой обработки низкочастотных сигналов гидроэлектрокинетического эффекта в прибрежной зоне. Использование широкополосного многоканального регистратора (частота дискретизации 1000 Гц) и приближённого представления входного тракта в виде параллельной RC-цепочки с высоким сопротивлением (порядка 100 кОм) и малой входной ёмкостью (менее 10 пФ) позволяет оценить влияние сетевых гармоник 50 Гц и эффективно подавлять их при помощи ФНЧ Баттерворта 4-го порядка. Показано, что предложенная методика сохраняет информативные низкочастотные компоненты, обеспечивая достоверность выделения волновой динамики на фоне техногенных помех.

Ключевые слова: гидроэлектрокинетический эффект, цифровая фильтрация, сетевые помехи, набегающие волны, прибрежная зона.

Для цитирования: Башкуев Ю. Б., Шунков А. Д. Обработка сигналов на фоне сетевых помех при регистрации гидроэлектрокинетического эффекта // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 76–78

Yu. B. Bashkuev, A. D. Shunkov

Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

**SIGNAL PROCESSING ON THE BACKGROUND OF POWER LINE INTERFERENCE
DURING REGISTRATION OF THE HYDROELECTROKINETIC EFFECT
ON THE SHORE OF LAKE BAIKAL**

Abstract. The paper presents a methodology for recording and digital processing low-frequency signals of the hydroelectrokinetic effect in the coastal zone. The use of a broadband multichannel recorder (sampling rate 1000 Hz) and an approximate representation of the input circuit as a parallel RC network with high resistance (about 100 kΩ) and low input capacitance (less than 10 pF) makes it possible to evaluate the influence of 50 Hz power line harmonics and effectively suppress them using a 4th-order Butterworth low-pass filter. It is shown that the proposed methodology preserves informative low-frequency components, ensuring reliable extraction of wave dynamics against the background of anthropogenic noise.

Keywords: hydroelectrokinetic effect, digital filtering, power line interference, incoming waves, coastal zone.

For citation: Bashkuev Yu. B., Shunkov A. D. Signal processing on the background of power line interference during registration of the hydroelectrokinetic effect on the shore of lake Baikal // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 76–78.

Гидроэлектрокинетические поля формируются при фильтрации воды через пористый грунт и регистрируются как низкочастотные импульсные изменения потенциалов, ассоциированные с движением жидкости в порах. В прибрежных районах с близко расположенной инфраструктурой измеряемый полезный сигнал испытывает влияние аддитивных помех бытовой электросети, включая гармоники 50 Гц, что делает необходимым использование методов цифровой фильтрации.

Цель исследования: разработать и апробировать метод цифровой обработки сигналов, обеспечивающий выделение полезной волновой компоненты при наличии интенсивных сетевых помех.

Регистрация производилась многоканальным широкополосным регистратором ZET 048-E с частотой дискретизации 1000 Гц. Входные характеристики регистратора: входное сопротивление ≈ 100 кОм, входная ёмкость < 10 пФ. Неизолированные электроды, у которых проводящая поверхность контактирует непосредственно с измеряемой средой, обладают хорошей чувствительностью к низкочастотным составляющим, но в то же время подвержены помехам окружающей среды. Измерительные электроды устанавливались вдоль береговой полосы и подключались к многоканальному входу регистрирующей системы.

Для оценки спектрального состава сигналов выполнено БПФ на отрезках записи до обработки. В исходных спектрах (рис. 1) доминировали линии, кратные 50 Гц, а также дополнительные линии в диапазоне 38–50 Гц.

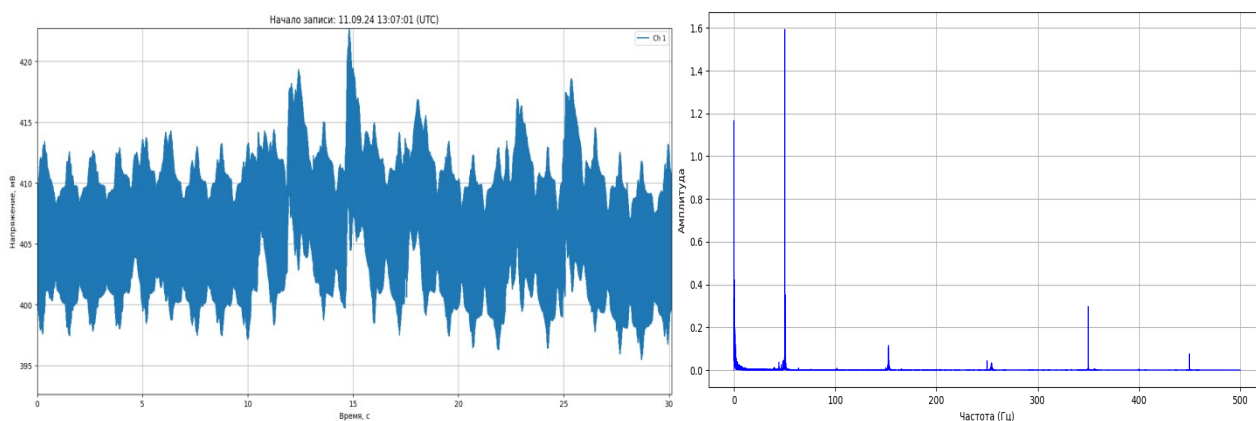


Рис. 1. Пример исходного сигнала и его спектр; значение амплитуды в мВ

Для подавления высокочастотных составляющих применён цифровой низкочастотный фильтр Баттерворта 4-го порядка с частотой среза 30 Гц. Выбор частоты среза основан на необходимости сохранить полезную низкочастотную часть спектра, ассоциированную с кинематикой прибрежных волн, и одновременно эффективно ослабить сетевые гармоники. После применения фильтра наблюдается заметное подавление гармоник сети и восстановление импульсной формы полезного сигнала (рис. 2), соответствующей набеганию волны.

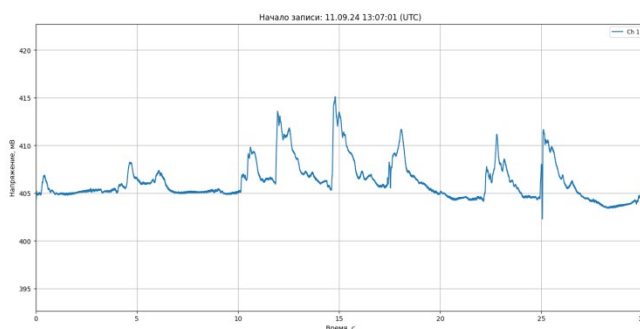


Рис. 2. Обработанный сигнал, отображающий динамику набегających волн

Проведённый анализ показал, что применение цифровой фильтрации позволяет эффективно выделять низкочастотные гидроэлектрокинетические сигналы на фоне сетевых и других внешних помех. Использование многоканального регистратора с частотой дискретизации 1000 Гц позволяет регистрировать сигналы с частотой до 500 Гц.

той дискретизации 1000 Гц обеспечивает достаточное разрешение для наблюдения динамики сигналов, а фильтр низких частот эффективно подавляет сетевые гармоники. Полученные результаты демонстрируют, что предложенный подход может быть использован для оптимизации методов регистрации и обработки сигналов в системах мониторинга прибрежных зон, а также служить базой для дальнейших исследований влияния внешних факторов на электрокинетические поля.

П. П. Бобров^{1,2}, Ю. А. Костычев², А. В. Репин¹, О. В. Родионова¹

¹Омский государственный педагогический университет, Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиопизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЧВ

Аннотация. Исследованы простые в изготовлении датчики для измерения диэлектрической проницаемости и влажности поверхностного слоя почв с целью сопоставления наземных и спутниковых данных. Датчики выполнены на основе отрезков симметричных полосковых и коаксиальных линий. Калибровка датчиков осуществлялась при измерении жидкостей с известными значениями комплексной диэлектрической проницаемости. Погрешность измерения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости почв составляет от 1 до 10%.

Ключевые слова: влажность почв, диэлектрические датчики, калибровочные жидкости, полосковые линии передачи, коаксиальные линии.

Для цитирования: Бобров П. П., Костычев Ю. А., Репин А. В., Родионова О. В. Широкополосные датчики для измерения диэлектрической проницаемости поверхностного слоя почв // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 79–81.

P. P. Bobrov^{1,2}, Yu. A. Kostychov², A. V. Repin¹, O. V. Rodionova¹

¹Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

BROADBAND SENSORS FOR MEASURING THE DIELECTRIC PERMITTIVITY OF THE SOIL SURFACE LAYER

Abstract. Simple-to-manufacture sensors for measuring the permittivity and moisture of the surface soil layer were investigated in order to compare ground-based and satellite data. The sensors were made on the basis of sections of symmetrical strip and coaxial lines. The sensors were calibrated by measuring liquids with known values of complex permittivity. The measurement error of the real part of the complex permittivity of soils is from 1 to 10%.

Keywords: soil moisture, dielectric sensors, calibration fluids, strip transmission lines, coaxial lines.

For citation: Bobrov P. P., Kostychov Yu. A., Repin A. V., Rodionova O. V. Broadband sensors for measuring the dielectric permittivity of the soil surface layer // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 79–81.

В настоящее время на орбите Земли существует несколько ресурсных спутников, измеряющих влажность поверхностного слоя почв методом микроволновой радиометрии с использованием диэлектрических моделей влажных почв. Наши измерения показали, что в некоторых случаях наблюдаются завышение измеряемых значений влажности почв на территории Омской области. Для более тщательно изучения этого вопроса разработаны простые в изготовлении датчики для измерения диэлектрической проницаемости в мегагерцовом и гигагерцовом диапазонах.

Два типа датчиков разработаны на основе симметричной полосковой линии. В

двухпортовом варианте измерительная ячейка содержит две переходных области, соединяющие коаксиальные высокочастотные *sm*-разъемы с областью измерений. Переходные области заполнены диэлектриком с диэлектрической проницаемостью, изменяющейся в диапазоне 10 МГц– 1,5 ГГц от 2,51 до 2,44. Расстояние между внешними электродами изменяется от 6 мм вблизи коаксиального разъема до 28,5 мм (расстояния между внешними электродами в рабочей области). При этом соответствующим образом изменяется ширина центральной полоски таким образом, чтобы обеспечить волновое сопротивление 50 Ом в каждом сечении переходных областей. В рабочей области ширина центральной плоски не изменяется, чтобы избежать искривление волнового фронта. Возрастание волнового сопротивления до 79 Ом (при воздушном заполнении) учитывается при расчете диэлектрической проницаемости из измеренных данных комплексного коэффициента передачи S_{12} . Погрешность измерения действительной части диэлектрической проницаемости почв в мегагерцовом диапазоне составляет 1-3%, а в гигагерцовом – 2-10%.

Также была исследована однопортовая ячейка, представляющая собой разрезанную пополам двухпортовую ячейку. Такую ячейку проще внедрять в почву. Процедура измерений заключается в определении комплексного коэффициента отражения S_{11} от входа ячейки. Расчет комплексной диэлектрической проницаемости вещества производился двумя способами: с использованием эквивалентной схемы ячейки на сосредоточенных элементах и с использованием схемы на распределенных элементах.

В первом случае значения элементов схемы определялись для случая воздушного заполнения через измеренные частотные положения f_s и f_p первых последовательного и параллельного резонансов соответственно и значение суммарной емкости C_Σ . Емкость C_Σ определяется в низкочастотном приближении (для частоты $f \ll f_s$) как отношение суммарной реактивной проводимости B_Σ измерительной ячейки к циклической частоте ω : $C_\Sigma = B_\Sigma / \omega$. Величина емкости C области измерений (с учетом краевой емкости C_k) была вычислена через значение погонной емкости по известному волновому сопротивлению линии. Собственная индуктивность ячейки L_p определяется по формуле Томпсона через значение частоты первого последовательного резонанса f_s . Активные проводимости g , g_p оказались настолько малы, что не учитывались при измерении почв. Значения элементов эквивалентной схемы для измерительной ячейки воздушного заполнения с расстоянием между внешними электродами 28,5 мм составили: $C_p = 5,958$ пФ; $C_k = 1,115$ пФ; $C = 0,867$ пФ; $L_p = 10,91$ нГн.

При погружении ячейки в почву все элементы эквивалентной схемы считались неизменными, кроме значений C и g . По их восстановленным значениям с помощью известных выражений восстанавливали действительную ($\epsilon' = C/C_0$, C_0 – емкость для воздушного заполнения) и мнимую ($\epsilon'' = g/(\omega C_0)$) части диэлектрической проницаемости измеряемого вещества. Результаты измерения изопропилового спирта приведены на рис. 1.

Схема на распределенных элементах содержит два отрезка линии – переходную и рабочую (измерительную) области. Последняя нагружена комплексным импедансом Z_n , отражающим краевую емкость и потери на излучение. Для определения Z_n были проведены измерения параметра S_{11} при заполнении измерительной области калибровочными жидкостями и найдены частотные зависимости комплексной проводимости нагрузки $Y_n = 1/Z_n$, затем на нескольких частотах были найдены регрессионные уравнения, связывающие Z_n с действительной и мнимой частями диэлектрической проницаемости измеряемого вещества. Результаты измерения изопропилового спирта также приведены на рис. 1.

Еще один протестированный датчик представлял собой открытый конец коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50 Ом. Пространство между проводниками заполнено фторопластом. Калибровка датчика основана на билинейной зависимости

между измеренным параметром S_{11} и комплексной диэлектрической проницаемостью эталонных материалов, в качестве которых использовались дистиллированная вода, диметилсульфоксид, этанол, изопропиловый спирт и дихлорэтан. Процедура калибровки основана на измерении параметра S_{11} для режимов холостого хода и короткого замыкания и одной из эталонных жидкостей.

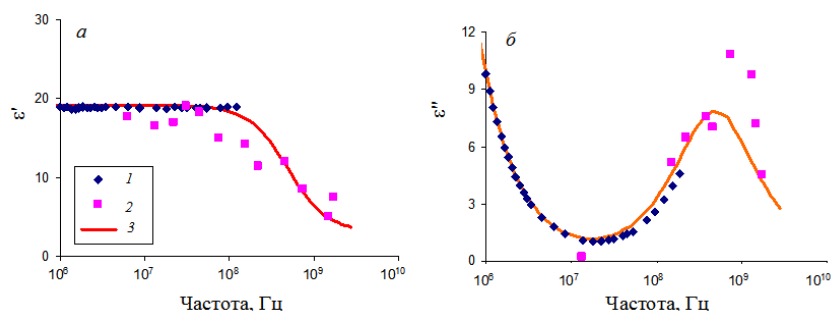


Рис. 1. Результаты измерения действительной (а) и мнимой (б) частей диэлектрической проницаемости изопропилового спирта:

1 – схема на сосредоточенных элементах,
2 – схема на распределенных элементах, 3 – модель Дебая

На рис. 2 представлены результаты измерения диметилсульфоксида, изопропилового спирта и порошка мелких стеклянных шариков. Калибровочной жидкостью являлась дистиллированная вода. На зависимостях для жидкостей видно, что в диапазоне от 100 МГц до 2 ГГц экспериментальные значения совпадают со значениями, рассчитанными по модели Дебая.

Для порошков значения ε' восстанавливаются до частоты 2-2,5 ГГц, а значения ε'' до 1,5 ГГц. Образец с большей влажностью восстановился лучше, что возможно связано с выбором воды, имеющей большую диэлектрическую проницаемость, в качестве эталонной жидкости для калибровки.

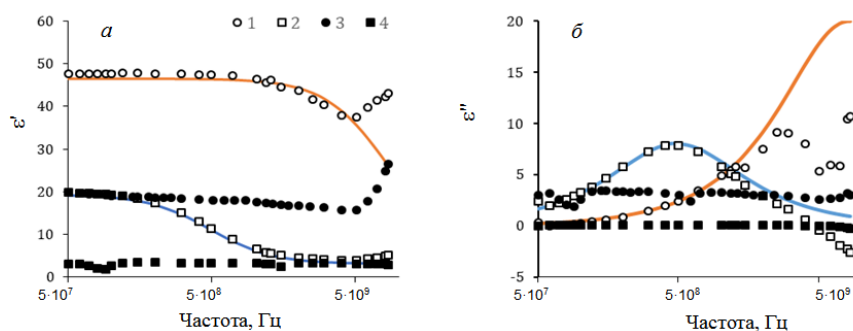


Рис. 2. Результаты измерения, действительной (а) и мнимой (б) частей комплексной диэлектрической проницаемости диметилсульфоксида (1), изопропилового спирта (2), влажного порошка (3) и воздушно-сухого порошка (4). Сплошные линии-модель Дебая

Достоинства и недостатки разных датчиков заключаются в следующем. Двухпортовая ячейка позволяет получать приемлемую точность измерений, но она неудобна для полевых измерений. Однопортовая ячейка из-за трудностей определения потерь на излучение обеспечивает необходимую точность на частотах ниже 100 МГц. Ячейка в виде открытого конца коаксиальной линии позволяет получать приемлемую погрешность в диапазоне от 100 МГц до 1,5-2 ГГц. Таким образом, совместное применение двух последних ячеек позволяет производить измерение диэлектрической проницаемости почв в диапазоне от 1 МГц до 1,5-2 ГГц.

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

А. Ю. Боровиков, В. М. Борисов, А. В. Соловьев
ПФ АО «НТЦ «Атлас», Пенза, Российская Федерация

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ДОВЕРЕННОЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СРЕДСТВАХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация. В докладе сообщается об угрозах информационной безопасности в комплексах связи, в которых применяются средства криптографической защиты информации, и предлагается применение доверенных аппаратно-программных платформ для защиты от указанных угроз. Описан опыт Пензенского филиала акционерного общества «Научно-технический центр «Атлас» в части разработки и проведения тематических исследований доверенных аппаратно-программных платформ – продуктов семейства «Горизонт», освещены перспективы развития линейки данной продукции.

Ключевые слова: доверенная аппаратно-программная платформа, отечественная базовая система ввода-вывода, средства вычислительной техники, средства криптографической защиты информации, средства защиты информации, загрузчик операционных систем «Горизонт», средство доверенной загрузки «Горизонт».

Для цитирования: Боровиков А. Ю., Борисов В. М., Соловьев А. В. Перспективы развития отечественной доверенной аппаратно-программной платформы для применения в средствах вычислительной техники // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 82–83.

A. Y. Borovikov, V. M. Borisov, A. V. Solovev
Penza branch of JSC “STC “Atlas”, Penza, Russian Federation

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF A DOMESTIC TRUSTED HARDWARE AND SOFTWARE PLATFORM FOR USE IN COMPUTER TECHNOLOGY

Abstract. The report describes the information security threats in communication complexes that utilize cryptographic information protection tools, and suggests to use trusted hardware and software platforms for protection against the specified threats. It describes the experience of the Penza branch of Joint-Stock Company “Scientific and Technical Center “Atlas” regarding development and carrying out of case studies of the entrusted hardware and software platforms – Horizon product family; and highlights the prospects for development of this product line.

Keywords: trusted hardware and software platform, domestic basic input/output system, computer hardware, cryptographic information protection tools, information security tools, Horizon operating system loader, Horizon trusted boot facility.

For citation: Borovikov A. Y., Borisov V. M., Solovev A. V. Prospects for the development of a domestic trusted hardware and software platform for use in computer technology // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 82–83.

В докладе представлена типовая схема комплекса связи и рассмотрены типовые требования по встраиванию средств криптографической защиты в комплексы связи, а также показаны обобщенные угрозы информационной безопасности, возникающие из-за невыполнения указанных требований.

В основной части доклада рассмотрены:

- меры защиты от вышеуказанных угроз информационной безопасности, в том числе использование доверенных аппаратно-программных платформ;
- основные проблемы, возникающие при разработке и исследовании изделий на базе доверенных аппаратно-программных платформ.

Предложены следующие готовые технические решения, применяемые при разработке доверенных аппаратно-программных платформ:

- в части процессорного модуля – применение отечественных аппаратных платформ СРС1311, СРС310 и МЦП1301, МЦП302;
- в части встроенного программного обеспечения – применение отечественной сертифицированной базовой системы ввода-вывода для аппаратных платформ СРС1311, СРС310, МЦП1301, МЦП302 с минимальным использованием заимствованного бинарного кода и с реализованными механизмами защиты информации (продукты: загрузчик операционных систем Горизонт и средство доверенной загрузки «Горизонт» - производитель Пензенский филиал акционерного общества «Научно-технический центр «Атлас»);
- в части операционной системы - использование сертифицированных отечественных операционных систем.

В докладе отмечается необходимость дальнейшего развития доверенных аппаратно-программных платформ в связи со сроком прекращения поставок аппаратных компонентов. В данном случае – компонентов аппаратной платформ Intel Atom E38XX, прекращение поставок которой планируется к 2028 году.

В настоящее время филиал ведет работы по адаптации продуктов семейства «Горизонт» на аппаратную платформу Intel Atom x6000 – модуль RSOM-01, который производится акционерным обществом «Научно-производственное объединение «Рубин», расположенным в городе Пенза. По окончании работ по адаптации запланировано проведение исследований перспективных продуктов семейства Горизонт на новой платформе по требованиям безопасности информации.

Применение доверенных аппаратно-программных платформ – отечественных продуктов семейства «Горизонт» позволяет выполнять требованиям регуляторов и обеспечить комплексную защиту от угроз информационной безопасности в средствах вычислительной техники, применяемых в комплексах связи и иных объектах информатизации.

М. С. Бунин, В. Т. Дмитриев

Рязанский государственный радиотехнический университет
Рязань, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ БИТРЕЙТА НА АЛГОРИТМЫ АУДИОКОДИРОВАНИЯ

Аннотация. Сравниваются цифровые аудиокодеки MPEG- 2 и AAC в трёх профилях (AAC LC, HE- AAC v1 и HE- AAC v2). Для сопоставления добавлен известный формат MP3. После краткого описания основных принципов работы кодеков приводится сравнение их эффективности с учётом субъективно сопоставимого качества звука. Проведены проверка взаимосвязи между уровнем битрейта и качеством звука в условиях вещания, а также выявление влияния других, часто более значимых факторов, таких как исходное качество записей и конкатенация неэнтропийного кодирования, на субъективное восприятие в цифровой трансляционной цепочке. Выводы подтверждаются результатами уникального исследования, дающего представление о том, какие конфигурации аудиокодирования применяются на практике для радиовещания DAB+ в Европе в целом и в отдельных странах.

Ключевые слова: DAB+, цифровое аудиовещание, психоакустическое сжатие, кодирование, MPEG, MP3, AAC, HE- AAC, репликация спектральных полос (SBR), параметрическое стерео (PS).

Для цитирования: Бунин М.С., Дмитриев В.Т. Влияние уровня битрейта на алгоритмы аудиокодирования // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 84–86.

M. S. Bunin, V. T. Dmitriev

Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russian Federation

THE INFLUENCE OF BITRATE LEVEL ON AUDIO CODING ALGORITHMS

Abstract. This article compares digital audio codecs MPEG-2 and AAC in three profiles (AAC LC, HE-AAC v1 and HE-AAC v2). The well-known MP3 format is also used for matching. After a brief description of the basic principles of the codecs, their effectiveness is compared taking into account subjectively comparable sound quality. The main contribution of the article is to verify the relationship between the bitrate level and sound quality in broadcasting conditions, as well as to identify the influence of other, often more significant factors, such as the initial quality of recordings and the concentration of non-entropic encoding, on subjective perception in the digital broadcast chain. These conclusions are supported by the results of a unique study that provides insight into which audio coding configurations are used in practice for DAB+ radio broadcasting in Europe as a whole and in individual countries.

Keywords: DAB+, digital audio broadcasting, psychoacoustic compression, encoding, MPEG, MP3, AAC, HE-AAC, spectral band replication (SBR), parametric stereo (PS).

For citation: Bunin M. S., Dmitriev V. T. The Influence of bitrate level on audio coding algorithms // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 84–86.

В исходной системе DAB применяется кодек MPEG- 2. В улучшенной версии DAB+ используется кодек Advanced Audio Coding (AAC), доступный в трёх профилях: AAC LC, HE- AAC v1, HE- AAC v2.

Для сравнения в обзор включён также хорошо известный формат MP3.

Самый старый из этих аудиокодеков – MPEG- 1 Audio Layer II (MP2). Он входит в

стандарт MPEG- 1 Audio, который включает три алгоритма кодирования: Layer I (MP1), Layer II (MP2) и Layer III (MP3); все они были одновременно стандартизованы в 1993 году как ISO/IEC 11172- 3.

MPEG- 2 (как и все три кодека этого стандарта) основан на предшествующем кодеке MUSICAM (Masking pattern adapted Universal Subband Integrated Coding and Multiplexing), разработанном немецким институтом IRT в 1989 году.

MPEG- 2 – это субполосный аудиокодек, в котором снижение битрейта достигается психоакустическим кодированием во временной области с использованием фильто-банка. На входе процесса кодирования исходный сигнал разделяется на 32 подполосы с помощью полосовых фильтров. К такому преобразованному сигналу затем применяется психоакустическая модель. На этапе последующего квантования учитываются особенности слуха при восприятии близких по частоте компонентов. Так называемое частотное маскирование использует тот факт, что при одновременном звучании мощного сигнала на одной частоте и более слабого сигнала на частоте, близкой к первой, слабый сигнал не воспринимается, если его уровень не превышает порог – интенсивность, заданную кривой маскирования. Кодер игнорирует компоненты, не достигающие этого порога, и может использовать освободившуюся ёмкость для кодирования полезной, слышимой части сигнала.

Соответственно, если звук в любой из 32 подполос психоакустическая модель оценивает как неразличимый, вся подполоса в этот период исключается из кодирования. Удаление замаскированных компонент практически не влияет на итоговое восприятие звука.

MPEG- 2 в своё время обеспечил заметный прогресс, позволив сжимать цифровое аудио в широком диапазоне вариантов: от 8 до 384 кбит/с при частотах дискретизации от 16 до 48 кГц. Предусмотрены четыре режима работы: mono, stereo, dual channel и joint stereo. Используя битрейт 192–256 кбит/с, можно добиться для стереосигнала высокого качества, субъективно сопоставимого с «CD- качеством». Студийному качеству стереосигнала соответствует битрейт 384 кбит/с. До недавнего времени MPEG- 2 использовался (и в некоторых случаях всё ещё используется) для цифрового радиовещания и телевидения.

MP3 (MPEG- 1 Audio Layer III) – другой аудиокодек этого стандарта. Он также был представлен в 1993 году, но из- за высоких аппаратных требований широкое распространение началось лишь с 1995 года. Ядро алгоритма, психоакустические характеристики и структура формата опираются на кодек MPEG- 2.

В отличие от MPEG- 2, MP3 – преобразующий кодек, работающий в частотной области: после преобразования из временной области входной сигнал представляется 576 спектральными компонентами. Это обеспечивает значительно более тонкое частотное разрешение, вследствие чего психоакустическую модель можно применять более выборочно и эффективно.

AAC реализован в обновлённой версии DAB (DAB+), а также в других платформах цифрового радио и телевидения (DRM+, DVB- T2, DVB- S2) и широком спектре аудио- и аудиовизуальных устройств (iPhone, iPod, iPad, iTunes, Nintendo, PlayStation и др.).

Профиль, объединяющий AAC LC и SBR, называется High Efficiency AAC Version 1 (HE- AAC v1). Когда SBR активен, кодируется и передаётся только нижняя часть спектра, содержащая наибольшее количество информации, важной для восприятия звука; ядро работает на половинной частоте дискретизации (обычно 24 кГц).

Верхние частоты (обычно выше ~12 кГц) кодируются с помощью надстройки SBR, а полная полоса восстанавливается в декодере приёмника.

DAB+ допускает использование трёх профилей кодека AAC в широком диапазоне битрейтов.

Как видно из описаний отдельных кодеков, они различаются не только применяемыми алгоритмами, но и эффективностью – степенью уменьшения битрейта при сохранении сопоставимого субъективного качества. Поэтому битрейт не может оцениваться сам по себе; его следует рассматривать только в связке с типом кодека. Звук в цифровом радиовещании неизбежно связан с использованием потерь сжатия на основе психоакустических моделей. Алгоритмы сжатия постоянно развиваются и совершенствуются.

В настоящее время наиболее эффективным и современным аудиокодеком является HE-AAC v2, то есть AAC с надстройками SBR и PS. Этот кодек способен обеспечивать высокое качество звучания даже при битрейте 48 кбит/с, что примерно в четыре раза меньше, чем требуется самому старому кодеку этой группы (MP3) для достижения аналогичного качества. Однако сам по себе уровень битрейта практически не имеет предсказательной ценности в отношении конечного качества звучания. С внедрением платформы DAB+ вся вещательная цепочка, то есть путь от студии звукозаписи до слушателя, становится полностью оцифрованной. Эту цепочку можно разделить на несколько этапов: создание медиаконтента, обработка в вещательных компаниях, обработка выходным аудиопроцессором вещания и сам процесс передачи сигнала. На каждом из этих этапов применяется как кодирование с потерями, так и декодирование. В цифровой вещательной цепочке такой процесс может повторяться многократно, причём зачастую с использованием различных алгоритмов. Анализ аудиокодеков, применяемых в DAB, с точки зрения всей системы радиовещания как единой среды показал, что результирующее субъективно воспринимаемое качество звука определяется тремя ключевыми факторами, которые оказывают гораздо большее влияние, чем сам уровень битрейта. Этими факторами являются: 1) техническое качество входного сигнала, 2) многократное каскадирование кодеков с потерями внутри всей цифровой вещательной цепочки, 3) корректный выбор конфигурации кодека и его параметров.

Р. Р. Бутрик

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ОБ УЧЕТЕ ВЛИЯНИЯ МЕСТНЫХ ПОМЕХ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АНТЕННО-ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ КВ-ДИАПАЗОНА

Аннотация. Представлены результаты натурных исследований влияния местных помех различной природы на спектрограмму антенно-приемной системы КВ-диапазона, размещенной в условиях индустриальной застройки. Проведены теоретические изыскания на предмет наличия способов минимизации помех, наводимых в антенно-приемной системе КВ-диапазона. Особое внимание уделено размещению антенно-приемной системы в соответствии с реальными условиями эксплуатации. Полученные результаты показывают, что при учете влияния местных помех различной природы можно повысить эффективности работы антенно-приемной системы КВ-диапазона.

Ключевые слова: КВ-диапазон, антенно-приемная система, уровень шума, ферритовые фильтры, гальваническая развязка.

Для цитирования: Бутрик Р. Р. Об учете влияния местных помех различной природы на эффективность антенно-приемной системы КВ-диапазона // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 87–89.

R. R. Butrik

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

ABOUT THE INFLUENCE OF LOCAL INTERFERENCE OF DIFFERENT ORIGIN ON THE EFFICIENCY OF THE HF-BAND ANTENNA RECEIVING SYSTEM

Abstract. The article presents the results of field studies of the impact of various local interference on the spectral pattern of the HF-band antenna receiving system placed in the industrial area. The purpose of the theoretical research was to find ways to minimize interference in the HF-band antenna receiving system. Special attention was paid to the placement of the antenna receiving system in accordance with the real conditions of operation. The results obtained show that taking into account the influence of local interference of different origin can improve efficiency of the HF-band antenna receiving system.

Keywords: HF band, antenna-receiving system, noise level, ferrite filters, galvanic isolation.

For citation: Butrik R. R. About the influence of local interference of different origin on the efficiency of the HF-band antenna receiving system // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 87–89.

Эффективность антенно-приемной системы, расположенной в индустриальных районах с повышенным уровнем помеховой обстановки в КВ-диапазоне напрямую зависит от мощности этих помех. Их источником может выступать как близлежащие здания, насыщенное различными электроприборами, так и питание самой антенно-приемной системы, которое осуществляется посредством её подключения к сети переменного напряжения 220В.

Вследствие этого появляется необходимость учёта местных помех в работе антенно-приемной системы и проводить поиск способов их минимизации.

Одним из наиболее очевидных, но часто упускаемых из виду путей проникновения

шумов в схему является фидерная линия. Проходя через зашумленное пространство, проводник получает шумовые наводки, которые посредством проводника передаются в приемное устройство в виде искаженного сигнала. Это явление получило название «антенный эффект фидера» - нежелательное излучение или приём электромагнитных волн проводниками электрического тока, не предназначенными для этих целей.

Возможным вариантом устранения этого эффекта является применение ферритовых фильтров, представляющих собой намотанный через ферритовые кольца «объемным витком» фидер, позволяющих снизить интенсивность помех, наводимых на кабель. Это позволит «локализовать» антенну и устранить возможность превращения фидера в приемную антенну с диаграммой направленности, непредсказуемо изменяющейся от частоты.

Также не следует исключать возможность проникновения помех по внутренней стороне оплетки фидера. Для их устранения целесообразно использовать гальваническую ВЧ-развязку входа приемника с последующим фидером и антенной. В гальванической развязке трансформаторного типа ток подаётся на первичную обмотку. Возникает переменное магнитное поле, формирующее магнитный поток в замкнутом сердечнике. Под действием индукции возникает переменный ток, протекающий по вторичной обмотке. Это позволяет физически разделить две электрические цепи.

Для реализации и проверки эффективности данных способов было организовано рабочее место, приведенное на рис. 1а.

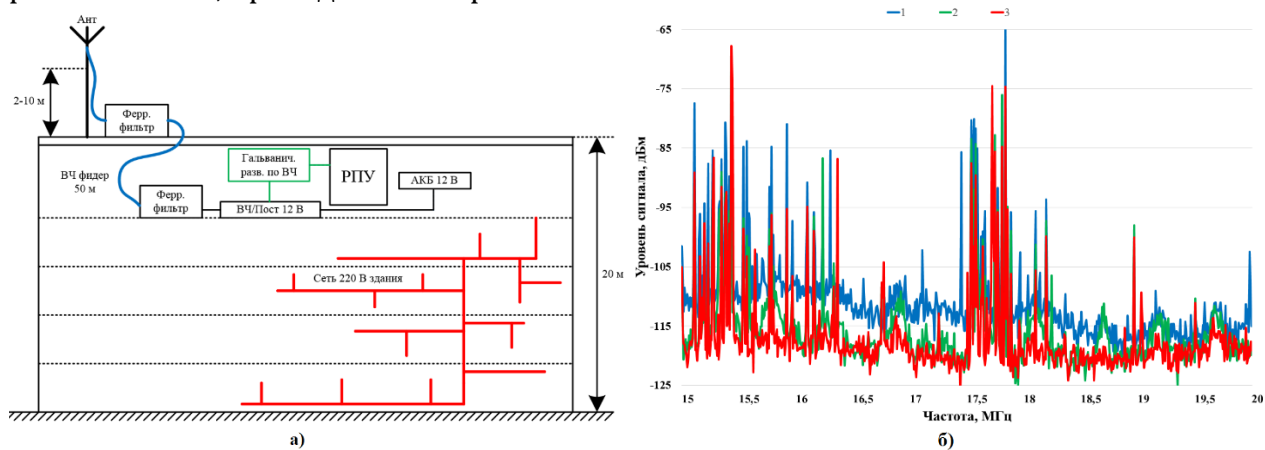


Рис. 1. Схематическое и графическое представление эксперимента: а) схема рабочего места, позволяющая оценить эффективность применения ферритовых фильтров и гальванической развязки; б) график, показывающий результаты реальных исследований:
1 – «грязный» фидер; 2 – фидер с установленными ферритовыми фильтрами;
3 – ферритовые фильтры + гальваническая развязка

Результаты исследования на примере одного частотного диапазона, приведенные на рис. 1б, показали, что установка ферритовых фильтров на фидер позволяет снизить шумы, принимаемые антенно-приемной системой на 5–10 дБ. В остальном диапазоне это снижение варьируется от 1–2 дБ в начале диапазона (2–10 МГц) до 15 дБ на частотах 20–25 МГц. Это позволяет утверждать, что даже простая установка ферритовых фильтров может повысить эффективность антенно-приемной системы. Также следует отметить влияние дополнительной установки гальванической развязки, проявляющееся в отсутствии «всплесков» спектра, присутствующих в случае установки только ферритовых фильтров.

Питание от сети переменного тока 220 В также оказывает влияние на эффективность работы антенно-приемной системы. Это связано с тем, что к этой же сети подключены и иные электроприборы, находящиеся в здании. Что создает разветвленную сеть

кабелей, каждый из которых может выступать как отдельный фидер, подверженный «антенному эффекту фидера».

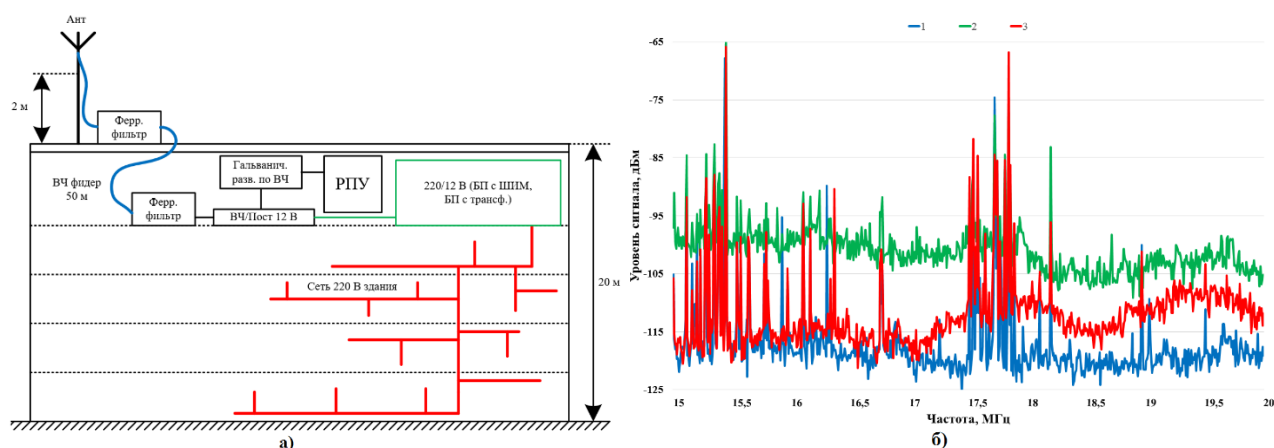


Рис. 2. Схематическое и графическое представление эксперимента: а) схема рабочего места, позволяющая проверить эффективность различных способов питания антенно-приемной системы; б) график, показывающий результаты реальных исследований: 1 – питание от АБ 12В; 2 – БП с ШИМ; 3 – трансформаторный БП

Для устранения этих эффектов необходимо отвязывать антенно-приемную системы от сети питания, посредством применения трансформаторных блоков питания. Включение такого трансформатора между антенно-приемной системой и сетью питания позволит отвязать её от сети 220 В, исключив тем самым НЧ-помехи от всей сети, проходящей сквозь здание, с подключенными к ней устройствами. Схема рабочего места эксперимента приведена на рис. 2а.

Результаты исследования, на примере одного частотного диапазона, приведенные на рис. 2б показывают, что применение блоков питания, отличных от автономной аккумуляторной батареи (АБ 12В) ухудшает эффективность системы на 20–25 дБ для блока питания с широтно-импульсной модуляцией (БП с ШИМ) и на 10–15 дБ для трансформаторного БП. Однако на более низких частотах (2–15 МГц) трансформаторный блок питания показывает даже более лучшие результаты, чем АБ 12В, но в диапазоне 17–30 МГц он начинает всё больше уступать автономному питанию. Питание через БП с ШИМ и вообще не стоит рассматривать, так как оно приводит к практически полной неспособности видеть некоторые сигналы.

А. В. Бучельников^{1,2}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиопизики и физической электроники)

Омск, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВХОДНОГО ИМПЕДАНСА ПРОВОЛОЧНОЙ ПОЛУРОМБИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ КВ-ДИАПАЗОНА С УЧЕТОМ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ

Аннотация. Представлена методика поэтапного моделирования проволочной полуромбической антенны КВ-диапазона, имеющей в своей конструкции согласующий широкополосный трансформатор сопротивления с коэффициентом трансформации 1:9 и оконечную нагрузку. Проведен сравнительный анализ входного импеданса модели антенны полуромбической, полученного путем ее поэтапного моделирования, с экспериментально измеренным входным импедансом антенны.

Ключевые слова: моделирование, входной импеданс, аperiодическая антенна, полуромбическая антенна, КВ-диапазон, антенно-согласующее устройство.

Для цитирования: Бучельников А. В. Моделирование входного импеданса проволочной полуромбической антенны КВ-диапазона с учетом элементов трансформации // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 90–93.

A. V. Buchelnikov^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

Omsk, Russian Federation

MODELING THE INPUT IMPEDANCE OF A HF WIRE SEMI-RHOMBIC ANTENNA TAKING INTO ACCOUNT TRANSFORMATION ELEMENTS

Abstract. The paper presents a method for step-by-step modeling of a HF wire semi-rhombic antenna, which has a matching broadband resistance transformer with a 1:9 transformation coefficient and a terminal load in its design. The input impedance of the semi-rhombic antenna model, obtained by step-by-step modeling, is compared with the measured input impedance of the manufactured antenna.

Keywords: modeling, input impedance, aperiodic antenna, semi-rhombic antenna, HF band, antenna matching device.

For citation: Buchelnikov A. V. Modeling the input impedance of a HF wire semi-rhombic antenna taking into account transformation elements // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 90–93.

Широкое распространение при работе комплексов радиосвязи КВ-диапазона, работающих на трассах различной протяженности, получили низкорасположенные аperiодические антенны с оконечными нагрузками или антенны бегущей волны (АБВ). АБВ – это антенны, содержащие прямолинейный отрезок линии передачи с потерями, которые обусловлены непрерывно происходящим вдоль его длины излучением радиоволн, причем направление преимущественного излучения или приема близко к направлению

продольной оси этого отрезка линии передачи.

В известных автору данной работы источниках моделирование (расчет) импеданса АБВ производится по входу излучателя антенны, что приводит к несоответствию входного импеданса между моделью и изготовленной антенной, т.к. последняя может содержать элементы, трансформирующие ее импеданс. Кроме этого, оконечная нагрузка, как правило, задается как резистивная нагрузка без потерь, что не соответствует действительности.

Целью данной работы является сравнительный анализ частотных характеристик входного импеданса антенны, с учетом влияния оконечной нагрузки и устройства согласующего (УС), полученные в результате моделирования и экспериментальным путем.

В данной работе в качестве объекта исследования выступала полуромбическая антенна (рис. 1), представляющая собой полотно излучателя антенны, подвешенное на мачту высотой 4 м, закрепленную с помощью системы оттяжек. Один из концов антенны нагружался на нагрузочное сопротивление, которое через систему противовесов замыкалось на землю. Противовесы раскладывались на поверхности земли в направлении от мачты. Противоположный конец антенны подключается к широкополосному УС с коэффициентом трансформации 1:9. К УС так же, как и к нагрузке, подключалась система противовесов, которая раскладывалась в направлении от мачты.

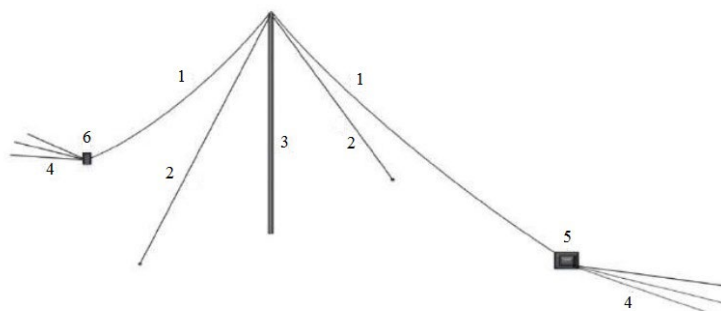


*Рис. 1. Антенна полуромбическая:
1 – полотно антенны, 2 – система оттяжек,
3 – мачта, 4 – система противовесов,
5 – широкополосный трансформатор,
6 – нагрузочное сопротивление*

Для получения частотных характеристик активной и реактивной частей импеданса антенны полуромбической были проведены измерения входного импеданса антенны, развернутой на открытой площадке. Измерение входных параметров, проводилось с использованием векторного анализатора цепей в режиме измерения активной и реактивной составляющих полного сопротивления R_e и Im в диапазоне частот от 1,0 до 31,0 МГц. Выполнялась калибровка прибора в соответствии с техническим описанием и инструкциями на прибор. По показаниям прибора в диапазоне частот 1,5-30 МГц с шагом 0,5 МГц фиксировалось значение реактивной составляющей измеряемой антенны, а затем на тех же частотах значение активной составляющей R . Также были измерены частотные зависимости активной и реактивной частей импеданса оконечной нагрузки (рис. 2).

Далее было проведено поэтапное моделирование рассматриваемой системы. На первом этапе была рассмотрена упрощенная модель антенны, представленная в виде двух проводников длиной 9 метров с вершиной, расположенной на высоте 4 метров. Полотно представляло собой медный провод диаметром 1 мм. С одной стороны полотно снизу подключалось точке питания, с другой – к комплексным нагрузкам, которые задавались согласно значениям, полученным при измерении импеданса оконечной нагрузки для соответствующей частоты.

Моделирование антенны проводилось в свободно распространяемом программном обеспечении NEC-2 for MMANA, использующим модель Зоммерфельда-Нортон для расчета антенн над реальной почвой. Для моделирования использовались параметры средней почвы (встречающейся на практике чаще всего) со значениями $\epsilon = 13$; $\sigma = 5$ мСм/м.

На втором этапе реактивная часть импеданса модели, полученная по входу антенны, пересчитывалась для соответствующей частоты в значение сосредоточенной емкости (C3) или индуктивности (L1), а активная часть напрямую использовалась в виде резистора (R1) в доступном пакете прикладных программ для расчета электрических цепей (рис. 3).

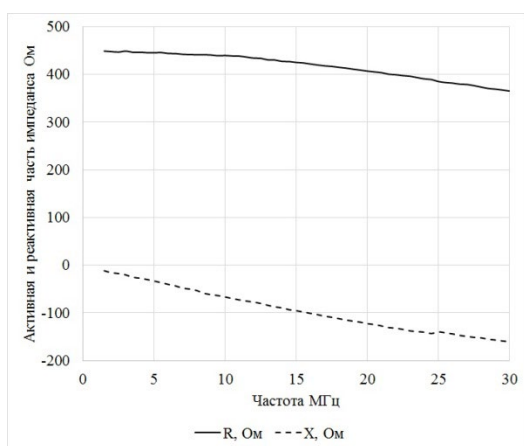


Рис. 2. Частотная характеристика активной и реактивной частей импеданса нагрузки

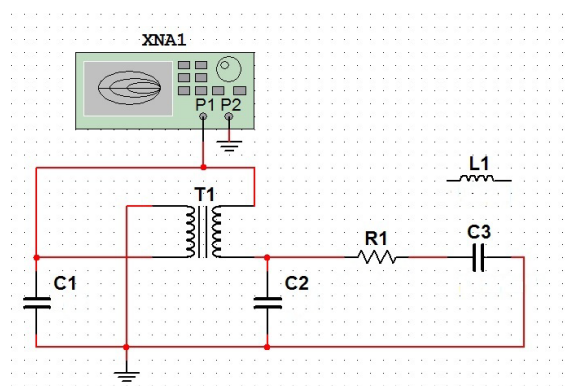


Рис. 3. Схема расчета импеданса на выходе согласующего трансформатора для комплексной емкостной или индуктивной нагрузки

На третьем этапе проводился расчет импеданса на выходе УС, с подключенной комплексной нагрузкой. Конденсаторы C1 и C2 имитировали паразитную емкость, возникающую между обмотками трансформатора (T1), на переходах, соединителях полотна и др. 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 антенны полуромбической с учетом влияния УС и оконечной нагрузки (рис. 4).

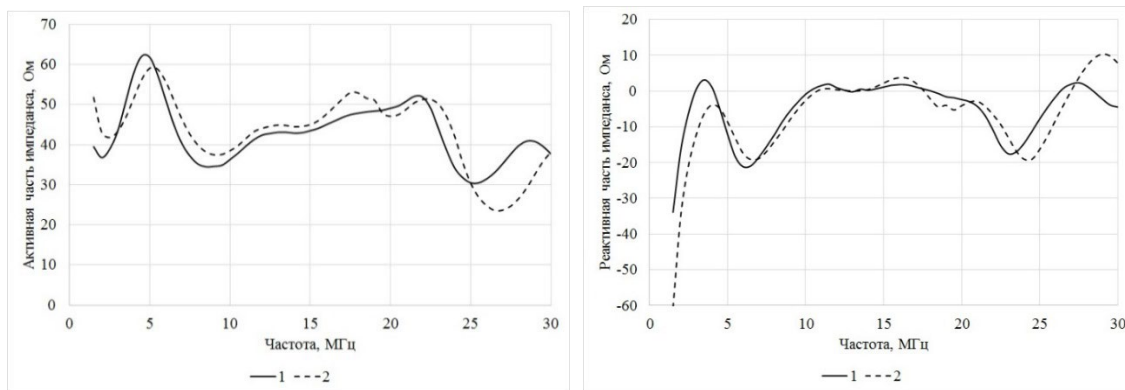


Рис. 4. Частотная характеристика активной и реактивной частей импеданса антенны полуромбической, измеренные экспериментально (1) и полученные в результате моделирования (2)

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Во-первых, учет влияния согласующего трансформатора, а также учет частотного изменения активной и реактивной составляющей оконечной нагрузки на этапе моделирования позволяет получить более точные частотные характеристики активной и реактивной части входного импеданса проектируемой антенны.

Во-вторых, включение дополнительных конденсаторов позволяет в некоторой степени имитировать паразитную емкость, возникающую между обмотками трансформатора, на переходах, соединителях полотна и др., но ее значение может отличаться в зависимости от конструкции антенны и устройства трансформации.

Полученная с применением данной методики частотная зависимость импеданса модели антенны при грамотном учете паразитных параметров элементов трансформации будет в значительной мере приближена к частотной зависимости импеданса изготовленной антенны.

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

С. А. Варнаков^{1,2}, А. С. Яценко², С. В. Кривальцевич^{1,2}

Т. Б. Клименко^{1,2}, А. О. Никифорова²

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиоп физики и физической электроники)

Омск, Российская Федерация

ВАРИАЦИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗНЫХ ТИПОВ ПОЧВ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Аннотация. Приведены результаты измерений диэлектрических характеристик нескольких типов почв Омской области. Показано, что отличия диэлектрических характеристик обусловлены гранулометрическим составом. Полученные результаты могут быть использованы при решении практических задач в радиосвязи.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, радиоп физические характеристики почв, подстилающая поверхность.

Для цитирования: Варнаков С. А., Яценко А. С., Кривальцевич С. В., Клименко Т. Б., Никифорова А. О. Вариации диэлектрических характеристик разных типов почв лесостепной зоны юга Западной Сибири // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 94–95.

S. A. Varnakov^{1,2}, A. S. Yashchenko², S. V. Krivaltsevich^{1,2}

T. B. Klimenko^{1,2}, A. O. Nikiforova²

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

Omsk, Russian Federation

VARIATIONS IN THE DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF DIFFERENT TYPES OF SOILS IN THE FOREST-STEPPE ZONE OF THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA

Abstract. The paper presents the results of measurements of dielectric characteristics of several types of soils in Omsk region. It is shown that differences in dielectric characteristics are caused by granulometric composition. The obtained results can be used in solving practical problems in radio communication.

Keywords: complex dielectric permittivity, radiophysical characteristics of soils, underlying surface.

For citation: Varnakov S. A., Yashchenko A. S., Krivaltsevich S. V., Klimenko T. B., Nikiforova A. O. Variations in the dielectric characteristics of different types of soils in the forest-steppe zone of the south of Western Siberia // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 94–95.

На сегодняшний день разработан ряд эмпирических и полуэмпирических моделей влажных почв, позволяющих описать зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от влажности, частоты и температуры. Однако они дают возможность определить комплексную диэлектрическую проницаемость только при определенных условиях. Создание универсальной модели для различных типов влажных почв в широком частотном диапазоне требует накопления большого массива экспериментальных данных.

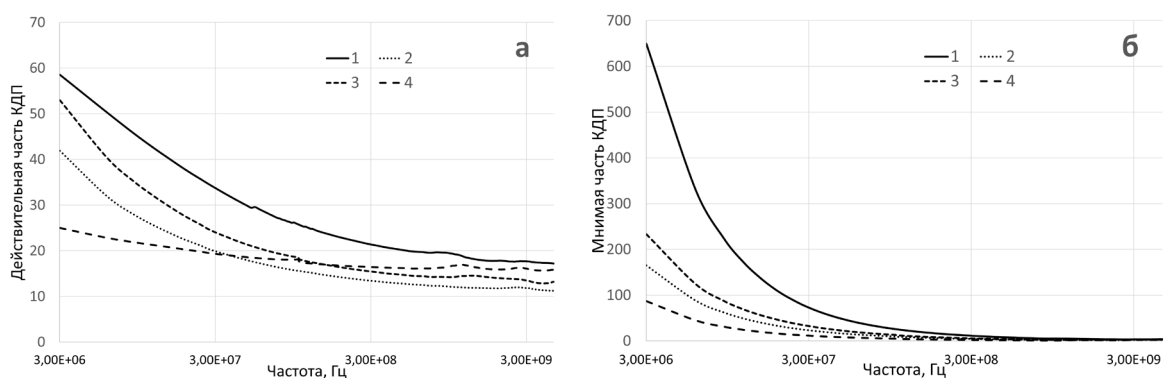
Целью данной работы является анализ влияния гранулометрического состава четырех образцов почв верхнего горизонта 0–10 см, отобранных в разных районах Омской области, на их диэлектрические характеристики.

Измерения проводились методом, разработанным и запатентованным сотрудниками научной лаборатории диэлькометрии и петрофизики при ОмГПУ в диапазоне частот от 3 МГц до 4,5 ГГц. Механический (содержание фракций) и катионно-анионный состав образцов почв определялся в Омском филиале ФГБУ «РосАгрохимслужба». Влажность определялась термостатно-весовым методом.

Диэлектрические спектры были получены для образцов, отобранных в следующих районах Омской области: в районе Петровского сельского поселения (образец №1), вблизи Valuевского сельского поселения (образец №2), вблизи села Старинка (образец №3), относящихся к суглинистым почвам, а также в районе Новотроицкого сельского поселения на левом берегу р. Иртыш (образец №4), относящегося к рыхлым песчано-глинистым осадочным горным породам (супесь). Соотношение фракций в образцах №1–3 варьируется в пределах: физической песок – 64,9–70,4%, физическая глина – 29,6–34,1%. Соотношение фракций в образце №4: физической песок – 88,6%, физическая глина – 11,4%. Все образцы не засолены.

Перед измерениями проводились подготовительные процедуры, избыточное увлажнение образцов дистиллированной водой, а также удаление крупных органических и механических включений.

На рисунке представлены графики зависимости действительной и мнимой части КДП от частоты при объёмной влажности образцов $30 \pm 2,7\%$.



Зависимость действительной (а) и мнимой (б) частей КДП от частоты образцов суглинистых почв (1, 2, 3), супеси (4)

Анализ полученных графиков подтверждает зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от гранулометрического состава. Более высокое содержание физической глины обуславливает более высокие значения как действительной, так и мнимой её части. Следует отметить более слабое изменение диэлектрического спектра с увеличением частоты образца №4, характерного для почв с высоким содержанием физического песка. Связано это в первую очередь с релаксационными процессами в почве. Более крупный размер частиц уменьшает удельную поверхностную площадь и соответственно снижает объем связанной воды.

Полученные результаты могут быть использованы при коррекции моделей влажных почв.

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

А. А. Васенина, К. А. Сидоренко

Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МОДЕЛИ NEQUICK В ПЕРИОД ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Аннотация. Представлены результаты анализа прогнозирования критической частоты F2-слоя ионосферы с использованием модели NeQuick. Расчет проводился для геомагнитных бурь различной интенсивности в период 24-го цикла солнечной активности.

Ключевые слова: модель NeQuick, геомагнитная активность.

Для цитирования: Васенина А. А., Сидоренко К. А. Оценка точности модели NeQuick в период геомагнитных бурь // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 96–98.

A. A. Vasenina, K. A. Sidorenko

Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

ANALYSIS OF THE NEQUICK MODEL EFFECTIVENESS DURING GEOMAGNETIC STORMS

Abstract. The report presents the results of the analysis of forecasting the critical frequency of the F2 layer of the ionosphere using the NeQuick model. The calculations were carried out for geomagnetic storms of varying intensity during the 24th solar activity cycle.

Keywords: NeQuick model, geomagnetic activity.

For citation: Vasenina A. A., Sidorenko K. A. Analysis of the NeQuick model effectiveness during geomagnetic storms // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 96–98.

Значительные возмущения в электронной структуре ионосферы, вызванные геомагнитными бурями, могут приводить к существенным изменениям критической частоты F2-слоя. В результате этого изменяются условия прохождения радиоволн: диапазон рабочих частот для коротковолновых радиосигналов может как расширяться, так и, что более критично, сужаться, что негативно сказывается на надежности радиосвязи. Для моделирования ионосферы применяются различные модели, включая IRI и NeQuick, позволяющие более точно прогнозировать изменения в ионосферных параметрах.

Следует подчеркнуть, что в последней версии модели NeQuick отсутствуют индексы геомагнитной активности, что означает, что она не предназначена для учета воздействия магнитных бурь. Тем не менее, учитывая широкий спектр применения модели, необходимо провести оценку возможных отклонений между моделью и экспериментом в условиях возмущенной геомагнитной обстановки.

В работе представлены результаты оценки влияния геомагнитных бурь на точность прогнозирования критической частоты слоя F2 при использовании модели NeQuick. Исследования проводились в рамках 24-го цикла солнечной активности, охватывающего период с 2009 по 2019 год.

На рис. 1 представлен график, иллюстрирующий зависимость средней процентной ошибки критической частоты слоя F2, вычисленной с применением модели NeQuick, от

экспериментальных данных, полученных с помощью вертикальных ионозондов. Зависимость рассматривается в контексте широтного расположения ионозондов и уровня геомагнитной бури.

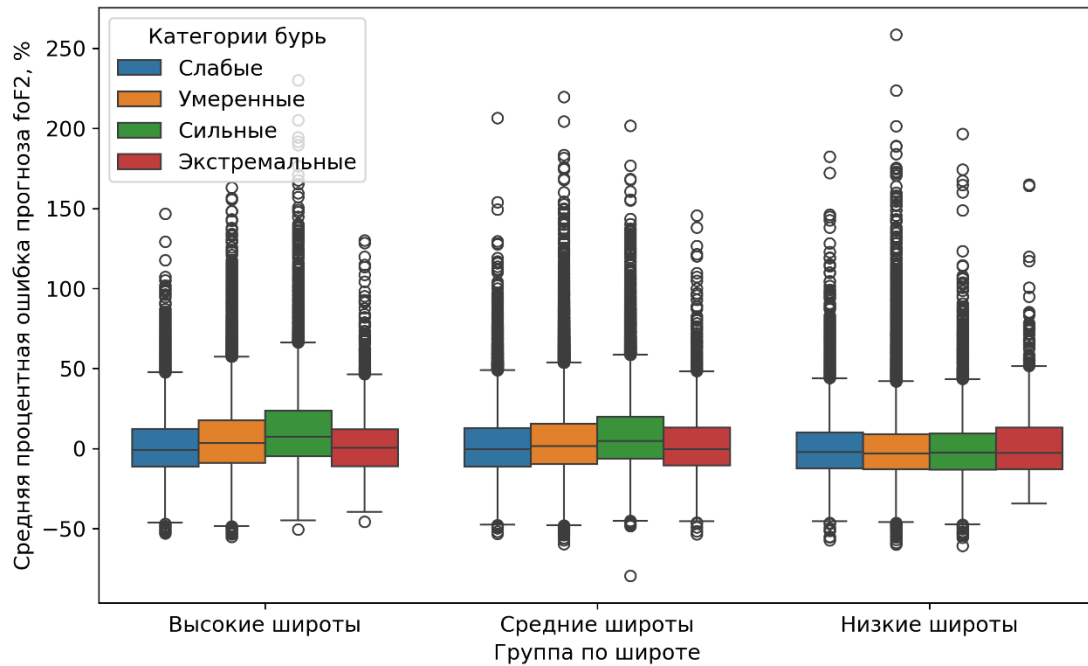


Рис. 1. Зависимость средней процентной ошибки прогнозирования критической частоты F2 слоя от интенсивности геомагнитных бурь для разных широт

На рис. 2 представлен аналогичный график, но зависимость рассматривается в контексте широтного расположения ионозондов и времени года.

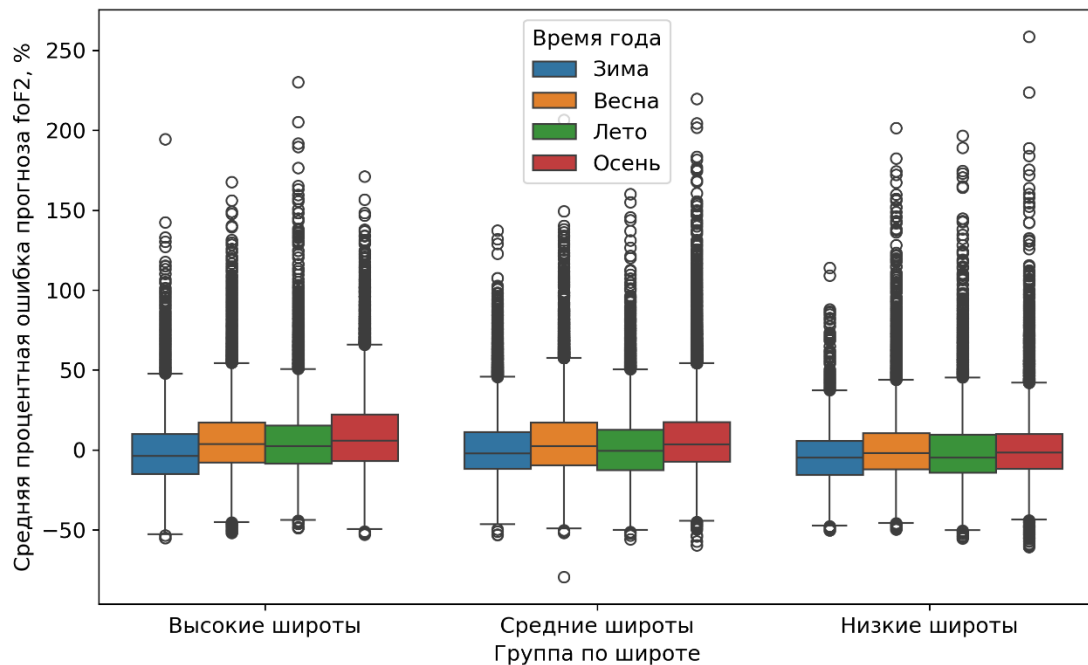


Рис. 2. Зависимость средней процентной ошибки прогнозирования критической частоты F2 слоя от времени года для разных широт

На рисунках представлены графические распределения данных в виде ящика с усами. Основные элементы данного графика включают сам ящик, который охватывает интерквартильный диапазон — разницу между первым и третьим квартилями; усы, представляющие линии, выходящие из ящика и демонстрирующие диапазон данных без учета выбросов; а также выбросы — точки данных, находящиеся за пределами усов, указывающие на аномалии в наборе данных. Внутри ящика отображается линия, обозначающая медиану. На графике можно наблюдать значительное количество выбросов для всех широтных групп и различных времен года. Завышение расчетного значения критической частоты может достигать 250%, тогда как занижение данных является более редким явлением и составляет около 50%.

Медианные значения средней процентной ошибки для высоких широт достигают максимума при сильных геомагнитных бурях, составляя около 11,5%, и минимума при слабых бурях — примерно 1,7%. В средних широтах наблюдается аналогичная тенденция, но с другими значениями: около 9% для сильных бурь и 2% для слабых. Однако в низких (экваториальных) широтах ситуация меняется: для всех категорий бурь медиана остается на уровне 1%.

При анализе данных по сезонам выявляются иные закономерности. Медианные значения становятся отрицательными лишь в зимний период для высоких и низких широт. В остальных сезонах медиана положительна и колеблется от 1% до 5%.

Исходя из рассмотренных данных можно сказать, что использование модели NeQuick в период магнитных бурь может привести к значительным ошибкам в прогнозе поведения ионосферы. Полученные данные будут использованы для оценки возможности применения искусственных нейронных сетей для повышения точности прогнозирования критической частоты в периоды геомагнитных возмущений.

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

В. В. Глотов, Н. Д. Майков

Воронежский государственный технический университет
Воронеж, Российская Федерация

МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ БЛИЖНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Аннотация. Описано введение в метод конечных элементов в целом и для уравнений Максвелла в частности. Практические вопросы, такие как работа с неструктурированными сетками и написание (простых) программ с помощью метода конечных элементов, будут рассмотрены подробно.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, ближнее поле, метод конечных элементов.

Для цитирования: Глотов В. В., Майков Н. Д. Метод конечных элементов для решения задач ближнего электромагнитного поля печатных плат // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 99–100.

V. V. Glotov, N. D. Maikov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

FINITE ELEMENT METHOD FOR SOLVING PROBLEMS OF THE NEAR ELECTROMAGNETIC FIELD OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

Abstract. This paper provides an introduction to the finite element method in general and to Maxwell's equations in particular. Practical issues such as working with unstructured meshes and writing (simple) programs using the finite element method will be discussed in detail.

Keywords: electromagnetic compatibility, near field, finite element method.

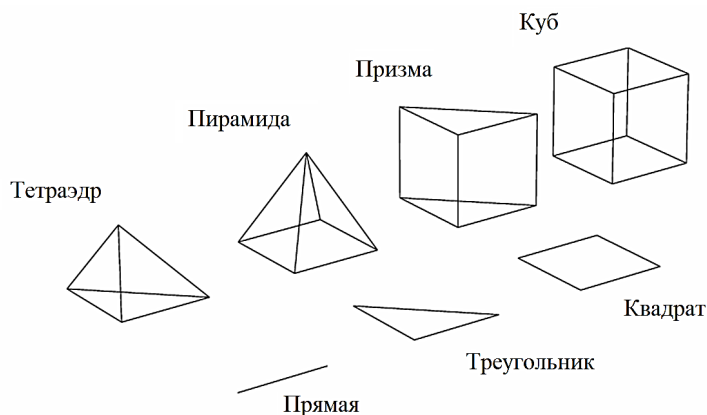
For citation: Glotov V. V., Maikov N. D. Finite element method for solving problems of the near electromagnetic field of printed circuit boards // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 99–100.

Метод конечных элементов является стандартным инструментом для решения дифференциальных уравнений во многих технических дисциплинах, таких как электромагнетизм, механика твердых тел и конструкций, гидродинамика, акустика и теплопроводность. Одним из самых сильных преимуществ данного метода и основной причиной его популярности во многих областях инженерии является его способность работать со сложными геометриями. Обычно это делается с использованием неструктурированных сеток. Они могут состоять из треугольников в двумерном случае и тетраэдров в трехмерном. Однако существует несколько типов форм элементов, как показано на рис.: треугольники и четырехугольники в двумерном случае, тетраэдры, призмы, пирамиды и шестигранники в трехмерном.

Неструктурированные сетки, например, с тетраэдрами, позволяют хорошо представлять криволинейные объекты, которые сложно представить на декартовых сетках, используемых в методах конечных разностей. Кроме того, неструктурированные сетки позволяют увеличить локальное разрешение для точного представления мелких деталей геометрии и быстрых изменений решения. Еще одним приятным свойством метода конечных элементов является то, что метод обеспечивает четко определенное представление искомой функции во всей области решения. Это делает возможным применение

ние многих математических инструментов и доказательство важных свойств, касающихся устойчивости и сходимости.

Недостатком метода конечных элементов по сравнению с методом конечных разностей является то, что в общем случае нельзя вывести явные формулы для обновления полей в задачах, решаемых во временной области. Вместо этого необходимо решать систему линейных уравнений для обновления полей. Следовательно, при использовании одинакового количества ячеек для обоих методов метод конечных элементов требует больше вычислительных ресурсов как с точки зрения времени процессора, так и объема памяти.



Различные формы элементов: отрезок в одномерном случае, треугольник и квадрат в двумерном случае, тетраэдр, призма, пирамида и куб в трехмерном случае

Мы начнем с описания общего алгоритма решения дифференциального уравнения с использованием метода конечных элементов. Уравнение записывается в виде $L[f]=s$, где L – оператор, s – источник, а f – неизвестная функция, которую нужно вычислить в области Ω .

- Разделим область решения Ω на ячейки или элементы. Например, двумерную область следует разделить на треугольники или четырехугольники.

- Приблизим решение с помощью разложения в конечное число базисных функций, т.е. $f(r) \approx \sum_{i=1}^n f_i \phi_i(r)$, где f_i – (неизвестные) коэффициенты, умножающие базисные функции $\phi_i(r)$. Базисные функции обычно являются полиномами низкого порядка, которые не равны нулю только в нескольких соседних элементах.

- Сформируем остаток $r=L[f]-s$, который мы хотим сделать как можно меньше. В общем случае он не будет равен нулю в каждой точке, но мы требуем, чтобы он был равен нулю в так называемом слабом смысле, устанавливая его средневзвешенное значение равным нулю.

- Выберем тестовые или взвешенные функции w_i , $i=1,2,\dots, n$, $i=1,2,\dots, n$ (столько же, сколько неизвестных коэффициентов) для взвешивания остатка r . Часто весовые функции совпадают с базисными функциями, $w_i = \phi_i$, и этот метод тогда называется методом Галеркина.

- Установим взвешенные остатки равными нулю и решим для неизвестных f_i ; т.е. решим систему уравнений $\int_{\Omega} w_i r \, d\Omega = 0, i = 1, 2, \dots, n$.

Математический термин «конечный элемент» обычно относится к элементу (например, треугольнику) вместе с полиномиальным пространством, определенным в этом элементе (например, пространством линейных функций), и набором степеней свободы, определенных в этом пространстве (например, значениями линейных функций в углах (узлах) треугольника). Это определение редко используется в электротехнике, вместо этого стремятся сосредоточиться на базисных функциях, используемых для расширения решения.

В. Т. Дмитриев, Ву Хоанг Шон

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина
Рязань, Российская Федерация

СЖАТИЕ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПАКЕТНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

Аннотация. Предложен метод сжатия речи на основе вейвлет-пакетного разложения, в котором степень сжатия напрямую контролируется путём задания процента отсекаемых коэффициентов (P , %). Сравнение различных вейвлетов показало, что Bior6.8 обеспечивает наилучшее воспринимаемое качество. При $P \leq 80\%$ качество восстановленного сигнала сохраняется на приемлемом уровне, что подтверждает эффективность метода для систем связи с ограниченной полосой пропускания.

Ключевые слова: речевой сигнал, вейвлет-пакетное разложение, степень сжатия.

Для цитирования: Дмитриев В. Т., Ву Хоанг Шон. Сжатие речевых сигналов на основе вейвлет-пакетного разложения // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 101–103.

V. T. Dmitriev, Vu Hoang Son

Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russian Federation

SPEECH SIGNAL COMPRESSION BASED ON WAVELET PACKET DECOMPOSITION

Abstract. The paper proposes a speech compression method based on wavelet packet decomposition, in which the compression ratio is directly controlled by setting the percentage of thresholded coefficients (P , %). Comparison of different wavelets showed that Bior6.8 provides the best perceptual quality. At $P \leq 80\%$, the quality of the reconstructed signal remains acceptable, confirming the effectiveness of the method for bandwidth-constrained systems.

Keywords: speech signal, wavelet packet decomposition, compression degree.

For citation: Dmitriev V. T., Vu Hoang Son. Speech signal compression based on wavelet packet decomposition // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 101–103.

Сжатие речевых сигналов играет ключевую роль в современных системах связи, позволяя уменьшить объём данных, снизить требования к полосе пропускания и памяти, что особенно важно в ресурсоограниченных приложениях — таких как передача речи по узкополосным каналам, хранение аудиоданных и кодирование голосовых сообщений. Одной из важнейших задач является достижение баланса между качеством восстановленного сигнала и степенью сжатия. Особый интерес представляют трансформационные методы, в частности вейвлет-пакетное разложение, обеспечивающее разреженное представление сигнала: основная энергия сосредоточена в небольшом числе крупных коэффициентов, тогда как большинство остальных близки к нулю. Это позволяет эффективно сжимать данные за счёт отсекаемых или квантования малых коэффициентов без заметного ухудшения качества.

В данной работе предлагается метод сжатия речи на основе вейвлет-пакетного раз-

ложения, включающий выбор базисной вейвлет-функции, декомпозицию сигнала, пороговую обработку, квантование и кодирование.

Выбор материнской вейвлет-функции играет ключевую роль в обеспечении высокого качества сжатия: оптимальный вейвлет должен обладать компактным носителем во временной и частотной областях, а также достаточным числом исчезающих моментов, что способствует концентрации энергии сигнала и снижению ошибки реконструкции. В исследовании использовались вейвлеты Haar, Bio6.8, Sym4 и Daubechies (Db4) с разложением до пятого уровня. Пятый уровень разложения был выбран как оптимальный, поскольку дальнейшее его увеличение не приводит к существенному росту качества представления сигнала, но значительно усложняет вычисления. При одинаковом уровне разложения, одном и том же входном речевом сигнале и фиксированной степени сжатия вейвлет Bio6.8 показал лучшие результаты по сравнению с остальными. На всех уровнях разложения до пятого восстановленная речь с использованием Bio6.8 оценивается выше на 0,45–0,76 балла по шкале MOS по сравнению с Haar, на 0,03–0,07 – по сравнению с Db4 и на 0,01–0,09 – по сравнению с Sym4.

После выполнения вейвлет-пакетного разложения речевого сигнала применяется пороговая обработка, направленная на удаление малых коэффициентов, содержащих в основном шум или малозначимые детали. Используется глобальный порог, одинаковый для всех уровней декомпозиции и всех узлов дерева разложения. Такой подход сохраняет коэффициенты с наибольшими абсолютными значениями, формируя разреженное представление сигнала в вейвлет-пакетной области. В данной работе пороговое значение задаётся через требуемый процент отсекаемых коэффициентов (P , %), что обеспечивает прямой контроль над степенью сжатия.

После пороговой обработки коэффициенты подвергаются равномерному квантованию. Размер шага квантования определяется тремя параметрами: максимальным значением коэффициентов ($m_{\max}$), минимальным значением коэффициентов ($m_{\min}$) и количеством уровней квантования L . Диапазон от $m_{\min}$ до $m_{\max}$ разбивается на L интервалов одинаковой ширины, формируя вектор разбиения и кодовую книгу. В результате коэффициенты квантуются до целочисленных значений. Указанные три параметра сохраняются в файле, чтобы на этапе восстановления можно было воссоздать таблицу квантования для выполнения обратного квантования.

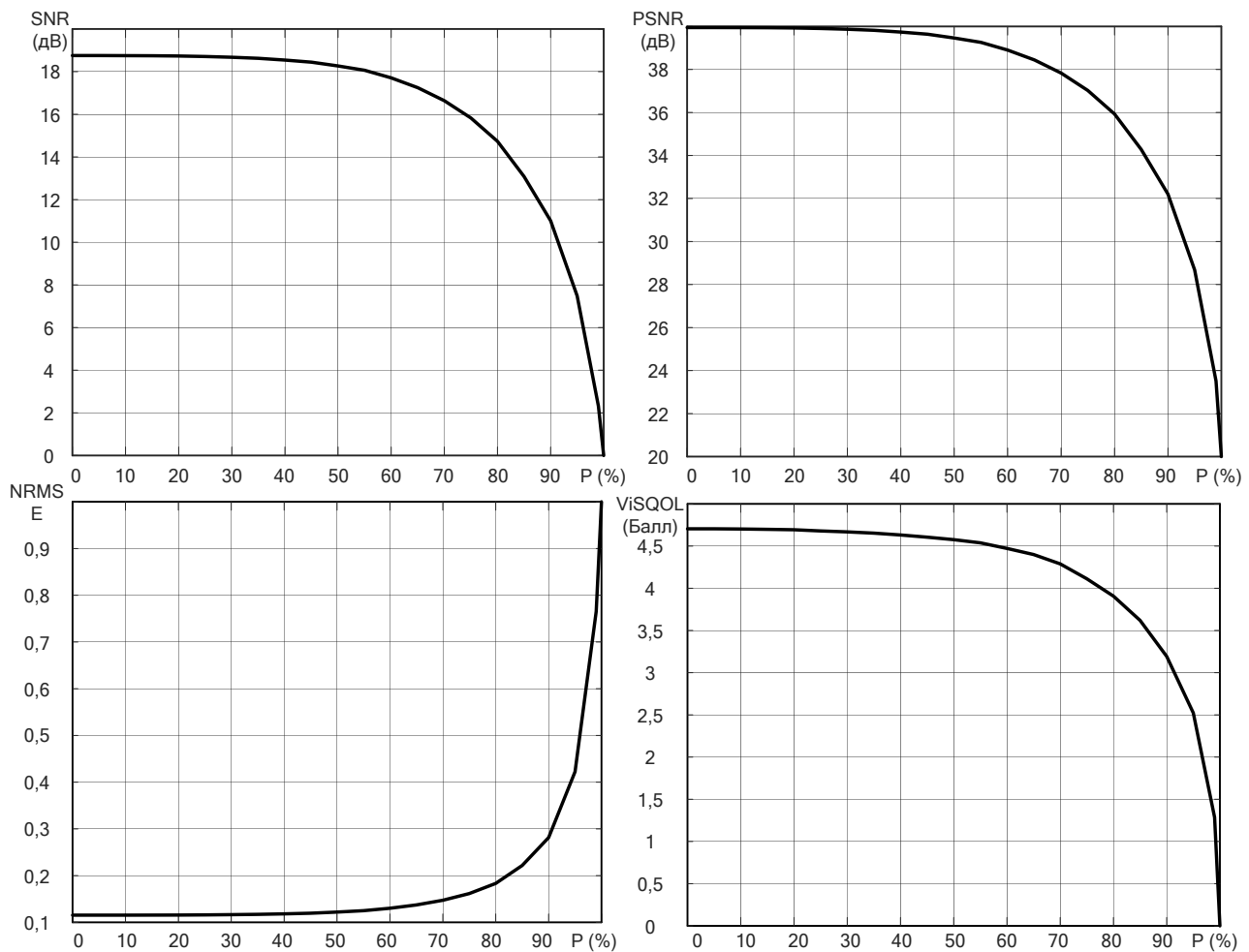
Для устранения избыточности квантованные данные подвергаются кодированию. На этом этапе возможно применение как методов сжатия без потерь, так и методов сжатия с потерями. Кодирование позволяет дополнительно сократить объём данных и снизить требования к полосе пропускания.

На приёмной стороне восстановление речевого сигнала выполняется путём последовательного применения декодирования, обратного квантования и обратного вейвлет-пакетного преобразования. Такой процесс обеспечивает получение сигнала, близкого к исходному, с качеством, зависящим от выбранных параметров сжатия.

Экспериментальные исследования проведены с использованием компьютерных моделей для оценки эффективности предложенного метода. В качестве тестовых данных применялись фрагменты речевых сигналов, соответствующие стандарту ГОСТ Р 50840-95. Для анализа применялся вейвлет Bio6.8 с глубиной разложения пять уровней. Качество сжатия оценивалось по объективным метрикам: SNR (отношение сигнал/шум), PSNR (пиковое отношение сигнал/шум), NRMSE (нормированное среднеквадратичное отклонение) и ViSQOL (Voice Signal Quality in Objective Listening – объективная оценка качества речевого сигнала). Полученные результаты представлены на рисунке.

Представленные результаты показывают, что качество восстановленного речевого сигнала существенно зависит от желаемого процента отсекаемых коэффициентов вейвлет-пакетного разложения (P , %). С увеличением P значения SNR и PSNR монотонно

уменьшаются, в то время как NRMSE возрастает. Эти изменения особенно резко проявляются при $P > 80\%$, что свидетельствует о снижении точности реконструкции сигнала. Потеря коэффициентов в первую очередь затрагивает высокочастотные детали и информационно значимые области спектра, включая форманты, что негативно влияет на естественность и разборчивость речи. Это особенно отчётливо отражается в резком падении метрики ViSQOL при $P > 80\%$. Таким образом, между степенью сжатия и качеством восстановления существует чёткий компромисс. Оптимальный диапазон для сохранения баланса — $P \leq 80\%$. Превышение этого порога приводит к существенной деградации сигнала, несмотря на высокую эффективность сжатия.



Зависимость объективных и перцептивных метрик качества от процента отсекаемых коэффициентов вейвлет-пакетного разложения (P , %)

Предложенный метод сжатия речи на основе вейвлет-пакетного разложения с регулированием степени сжатия через процент отсекаемых коэффициентов позволяет эффективно управлять балансом между объёмом данных и качеством восстановления. Эксперименты показали, что при сохранении ключевых коэффициентов в критически важных частотных диапазонах возможно достижение высокой степени сжатия без значительной деградации воспринимаемого качества. Полученные результаты подтверждают применимость данного подхода для систем связи с ограниченной полосой пропускания.

А. А. Егорова^{1,2}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

²Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

АКТУАЛЬНОСТЬ ИСПЫТАНИЙ РАДИОПРОДУКЦИИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К КЛИМАТИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ

Аннотация. На работоспособность радиопродукции могут оказывать существенное влияние условия окружающей среды, в которых она эксплуатируется. Под влиянием факторов окружающей среды в элементах устройств протекают сложные физико-химические процессы, изменяющие их свойства и вызывающие отказы радиоэлектронной техники. В работе приводится анализ необходимости совершенствования климатического испытательного оборудования для тестирования радиопродукции.

Ключевые слова: атмосферная влажность, температура окружающей среды, климатические условия, испытательное оборудование, радиопродукция.

Для цитирования: Егорова А. А. Актуальность испытаний радиопродукции на устойчивость к климатическим условиям // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 104–106.

А. А. Egorova^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

RELEVANCE OF RADIO PRODUCTION TESTING FOR RESISTANCE TO CLIMATIC CONDITIONS

Abstract. The performance of radio products can be significantly affected by the environmental conditions in which they are operated. Under the influence of environmental factors, complex physical and chemical processes occur in the components of devices, which can change their properties and cause failures in radio-electronic equipment. This paper analyzes the need to improve the climate testing equipment for testing radio products.

Keywords: atmospheric humidity, ambient temperature, climatic conditions, testing equipment, radio products.

For citation: Egorova A. A. Relevance of radio production testing for resistance to climatic conditions // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 104–106.

Для обеспечения стабильной работы радиоэлектронной продукции при разработке и производстве необходимо учитывать условия, в которых она в дальнейшем будет эксплуатироваться. Например, резкие колебания температуры и повышенная влажность могут привести к изменению электрофизических свойств и механических характеристик используемых материалов.

Специальная техника, такая как радиоэлектронная продукция, требует проверки на устойчивость к различным климатическим факторам. Если радиоэлектронное средство эксплуатируется на открытом воздухе, при производстве изделие должно пройти испытание на устойчивость к климатическим условиям в специальном испытательном оборудовании, воспроизводящем необходимые условия, близкие к условиям эксплуатации. По результатам испытаний радиопродукции можно сделать вывод о надежности и

работоспособности данного изделия. Все испытания проводят в климатических камерах, подобранных в соответствии с необходимыми условиями испытаний.

Самыми явными факторами, оказывающими влияние на работоспособность радиоэлектронной продукции, являются температура и влажность, при которых она эксплуатируется. В ходе эксплуатации радиоэлектронной продукции немалое воздействие может оказывать температура окружающей среды, в которой она эксплуатируется. Воздействие повышенной температуры может привести к изменению физико-химических и механических свойств материалов электроэлементов. Тепловое воздействие может привести к изменению свойств аппаратуры из-за изменения электрического сопротивления резисторов, ухудшения сопротивления изоляции диэлектриков, изменения емкости конденсаторов и прочего, это вызывает отклонение параметров радиоэлектронной продукции и может привести к постепенному отказу оборудования.

Тепловое воздействие также приводит к старению материалов. Некоторые элементы аппаратуры, в частности электролитические конденсаторы, химические источники питания, при низких температурах теряют свои свойства. Ухудшение параметров изоляционных материалов может привести к механическим повреждениям конструкции в целом. Например, из-за повышения вязкости часто наблюдается увеличение трения между отдельными подвижными элементами конструкции.

Атмосферная влажность в свою очередь увеличивается вместе с ростом температуры и может оказывать влияние на различные компоненты радиоэлектронной продукции:

- при воздействии влаги на металлические компоненты приборов происходит их разрушение, вызванное коррозией;
- при повышенной температуре, проникая в поры металла вода испаряется и вызывает его разрушение за счёт увеличения объёма при испарении;
- при понижении температуры ниже 0 °С лакокрасочные покрытия подвергаются разрушению из-за замерзания воды и образования льда.

Для создания соответствующих условий для испытания радиопродукции на устойчивость к климатическим условиям используют соответствующее испытательное оборудование. На сегодняшний день на рынке испытательного оборудования наблюдается большое разнообразие как импортных, так и отечественных камер для проведения испытаний.

Однако условия в таких камерах воспроизводятся не в полном объеме. Например, при испытаниях продукции на устойчивость к влажности используется дистиллированная вода, однако она отличается от атмосферных осадков своим составом. В зависимости от количества примесей различают дождевую воду, воду рек и озер, морскую и подземную. При проведении испытаний необходимо учитывать влияние необходимого вида воды на испытываемое изделие. Например, в 1 л дождевой воды содержится 1,5 мг азотных соединений, в тумане – 4,4 мг, в снеге – 7,5 мг. В дожде и тумане тропического пояса больше азотистых соединений, в континентальных осадках преобладают сульфаты и гидрокарбонаты, в морских – хлориды. Химический состав атмосферной воды при взаимодействии с материалом корпуса радиопродукции способствует более быстрому протеканию коррозии металлов, гидролизу и в некоторых случаях даже распаду некоторых материалов конструкции радиопродукции, что приводит к постепенным и внезапным отказам или к снижению эффективности функционирования изделия.

Заключение

Таким образом, при производстве продукции необходимо учитывать климатические зоны, в которых она будет эксплуатироваться, так как для различных зон эксплуатации характерны различные сочетания и длительность воздействия климатических факторов, которые должны учитываться при проведении испытаний радиопродукции.

Однако даже после успешного проведения испытаний на различных этапах производства радиопродукции в реальных условиях эксплуатации устройства начинают отказывать. Причиной отказа может служить неполнота или неточность воспроизведения условий эксплуатации при испытании радиоэлектронной продукции в климатических камерах.

Поэтому при испытаниях радиопродукции на устойчивость к климатическим условиям необходимо учитывать все факторы, которые могут повлиять на работоспособность радиопродукции, кроме того, необходимо, чтобы при испытаниях радиопродукции на предприятиях условия воспроизводились с должной точностью и были максимально приближены к реальным условиям эксплуатации радиопродукции.

А. Д. Ефремов

Центральное конструкторское бюро автоматики, Омск, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С БОКОВЫМ ВЫХОДОМ В ДВУХ ИСПОЛНЕНИЯХ

Аннотация. Рассматривается процесс моделирования плоской спиральной антенны в двух исполнениях. Описывается проектирование в среде электродинамического моделирования, изготовление макета, измерение и сравнение экспериментальных данных с расчетными.

Ключевые слова: плоская спиральная антенна, широкополосность, пассивная радиолокация, диаграмма направленности, расчет и оптимизация, коэффициент усиления.

Для цитирования: Ефремов А. Д. Моделирование плоской спиральной антенны с боковым выходом в двух исполнениях // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск :ОНИИП, 2025. С. 107–112.

A. D. Efremov

Central Design Bureau of Automatics, Omsk, Russian Federation

MODELING OF A FLAT SPIRAL ANTENNA WITH SIDE OUTPUTS IN TWO IMPLEMENTATIONS

Abstract. The paper provides the review of the process of modeling a flat spiral antenna in two implementations. It describes the design in the electrodynamic modeling application, the manufacture of a model, measurement and comparison of experimental data with the calculated ones.

Keywords: flat spiral antenna, broadband, passive radar, antenna pattern, calculation and optimization, gain.

For citation: Efremov A. D. Modeling of a flat spiral antenna with side outputs in two implementations // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 107–112.

Целью проделанной работы было моделирование плоской спиральной антенны с боковым выходом в двух исполнениях, которые отличаются между собой ориентацией корпуса трансформатора относительно излучателя, при этом положение втулки трансформатора и плоской спирали должны быть одинаковы. Это условие необходимо для синфазного приема сигнала.

Внешний вид и габариты антенны определялись исходя из имеющихся требований к разрабатываемым изделиям. Антенна представляет собой плоскую печатную спиральную плату, расположенную в цилиндрическом металлическом резонаторе и возбуждаемую кососрезанным симметрирующим трансформатором.

На рис. 1 представлены исполнения плоской спиральной антенны с соосным и боковым выходом разъема. На выходе антенны по экрану распаивается кабель, на кабеле распаивается разъем SMP, центральная жила кабеля проходит через втулку трансформатора и доходит до места входной контактной площадки плоской спирали. Концы трансформатора в вершине срезаются по высоте на 0,5 мм над поверхностью платы.

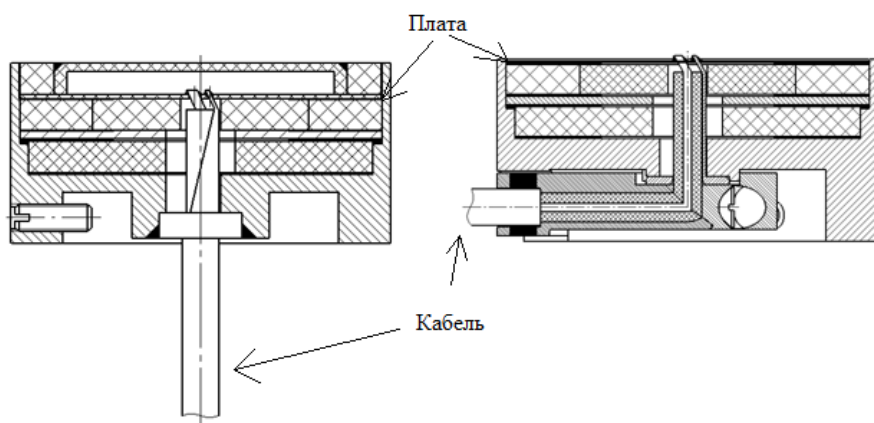


Рис. 1. Конструкции первоначального вида и второго исполнения плоской спиральной антенны

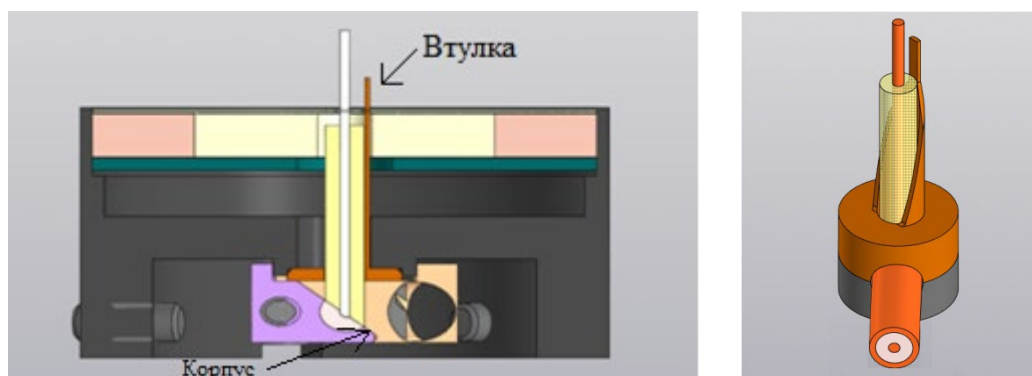


Рис. 2. Внешний вид трансформатора антенны в разрезе и согласующего трансформатора плоской спиральной антенны

Для получения требуемой идентичности фазовых характеристик вариантов антенн втулка трансформатора остается неподвижной, а корпус (см. рис. 2) вращается относительно корпуса антенны, что позволяет оставить трансформатор (см. рис. 2) в нужном направлении относительно излучателя. Внешний вид показан на рис. 3.

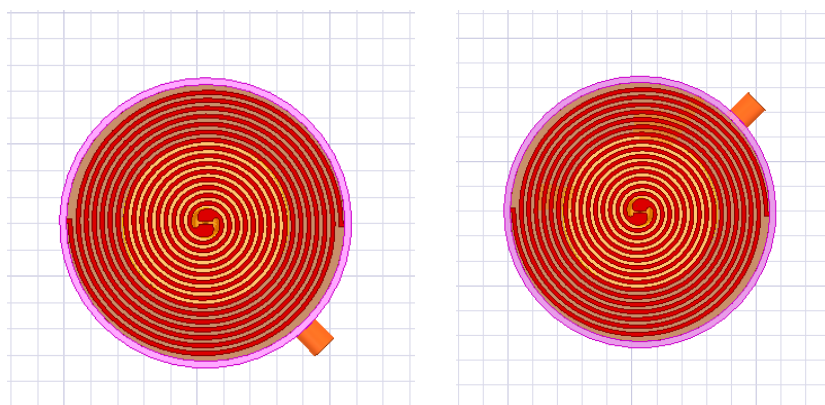


Рис. 3. Внешний вид плоской спиральной антенны в двух исполнениях с боковым выходом

Основными требованиями к радиотехническим характеристикам являлись: $K_{СВН} \leq 2,0$, коэффициент усиления (КУ) в максимуме диаграммы направленности не менее минус 4 дБ в нижней части частотного диапазона и не менее 1 дБ в верхней части диапазона. Ширина диаграммы направленности по уровню 0,5 (ШДН) должна быть не

менее 70 градусов во всем диапазоне рабочих частот. На рис. 4-6 показаны оптимальные расчетные характеристики модели.

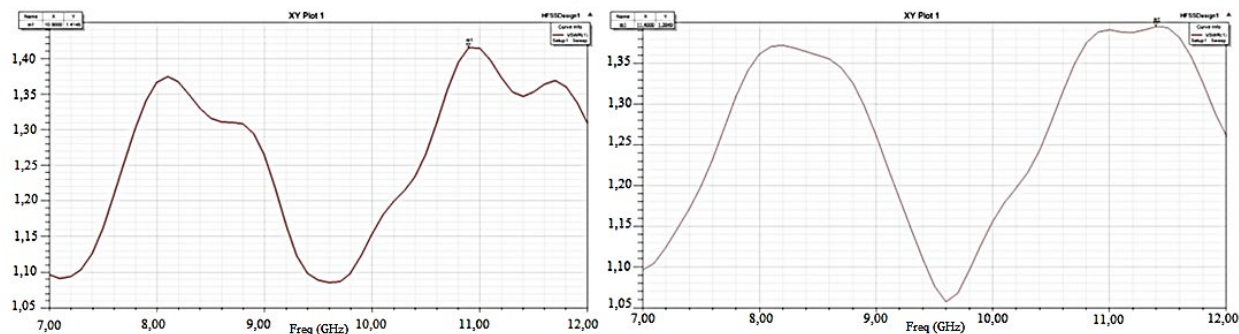


Рис. 4. КСВН антенны в первом и втором исполнении

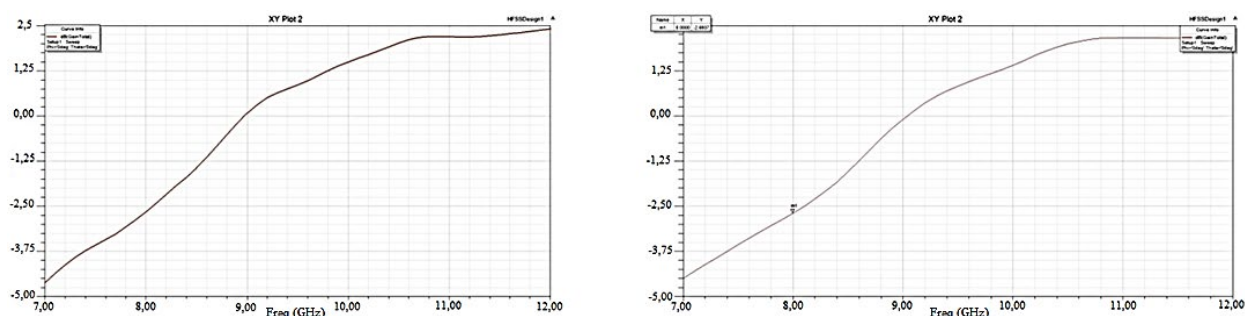


Рис. 5. КУ антенны в первом и втором исполнении в диапазоне частот

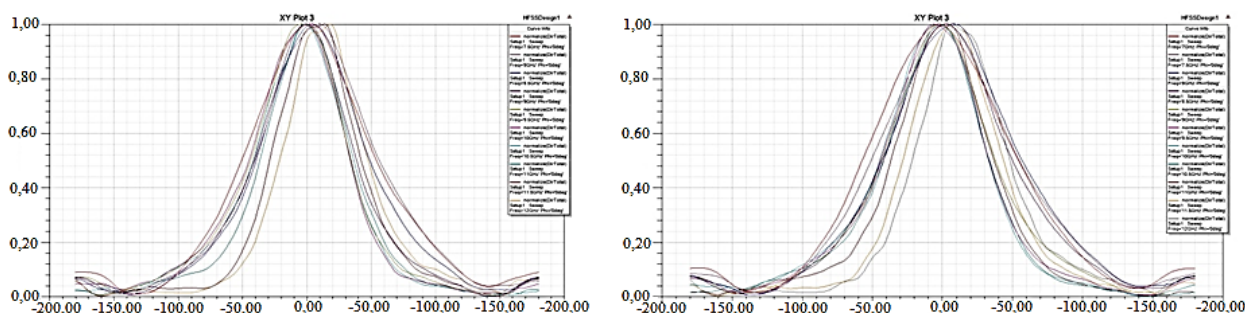


Рис. 6. Диаграммы направленности антенн в первом и втором исполнении $F_{ср}$

В процессе проектирования было рассмотрено два исполнения плоской спиральной антенны (см. рис. 3), которые отличаются между собой расположением бокового выхода. Исполнения антенны необходимы из требования обеспечения комплексирования с другими составными частями.

На рис. 7 продемонстрирована антенная система, состоящая из четырех антенн (W1-W4) первого исполнения и трех антенн (W5-W7) второго исполнения, которые установлены на металлическом диске таким образом, что линии, проведенные через точки запитки спиралей, параллельны оси Y.

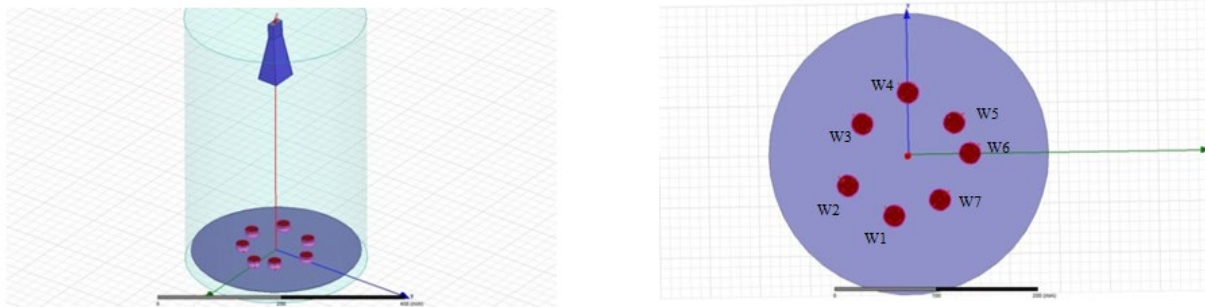


Рис. 7. Расположение антенн разных исполнений на диске

Система из 7 антенн облучается рупорной антенной. Важной характеристикой антенной системы является разность фаз между антеннами, которая определяет пеленгационную характеристику системы, значения которой были рассчитаны в среде электродинамического моделирования. Размещение антенн соответствует требованиям ТЗ на разработку антенной системы.

На рис. 8 изображены значения разностей фаз 2–6 антенн относительно первой антенны в составе антенной системы.

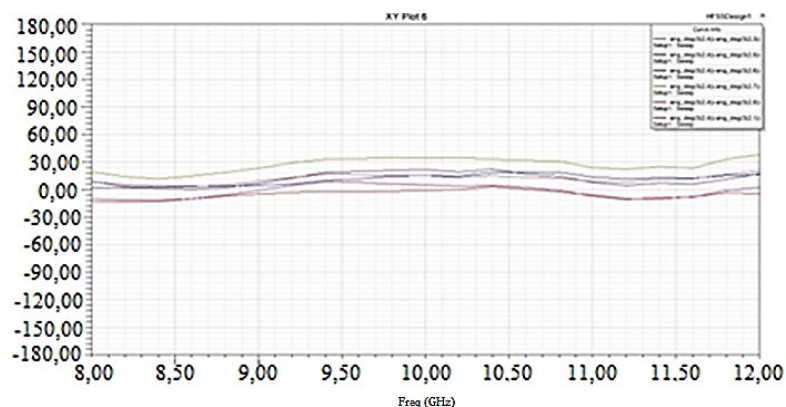


Рис. 8. Графики значения разностей фаз при использовании антенн в составе антенной системы

Графики разности фаз имеют разброс в 30 градусов, данное значение соответствует требованиям к разрабатываемому изделию.

По результатам моделирования можно сказать о том, что первое и второе исполнение плоской спиральной антенны с боковым выходом можно использовать в составе антенной системы, так как полученные результаты соответствуют требованиям выданного ТЗ.

Измерение макета плоской спиральной антенны с боковым выходом. На основе полученных в результате моделирования данных был изготовлен макет со следующими габаритами: диаметр антенны 22 мм, высота антенны 10,5 мм. КСВН макета приведен на рис. 9.

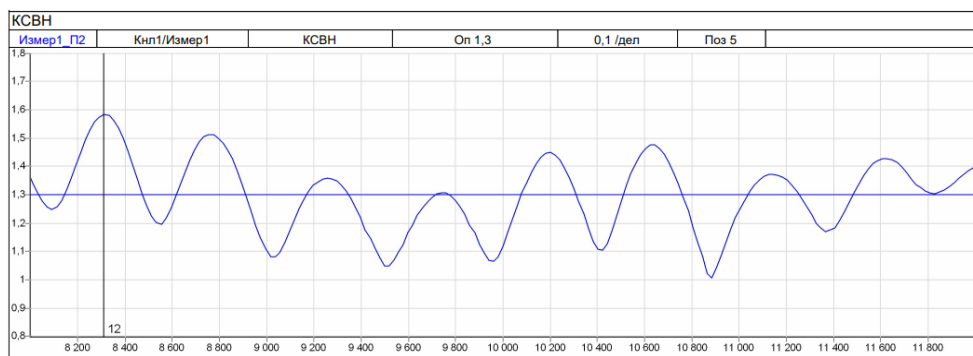


Рис. 9. КСВН плоской спиральной антенны с боковым выходом

Диаграммы направленности макета измерялись в азимутальной плоскости на автоматизированном рабочем месте во всем рабочем диапазоне частот. Ниже на рис. 10, 11 приведены ДН макета плоской спиральной антенны с боковым выходом в рабочем диапазоне частот на вертикальной поляризации передающей антенны.

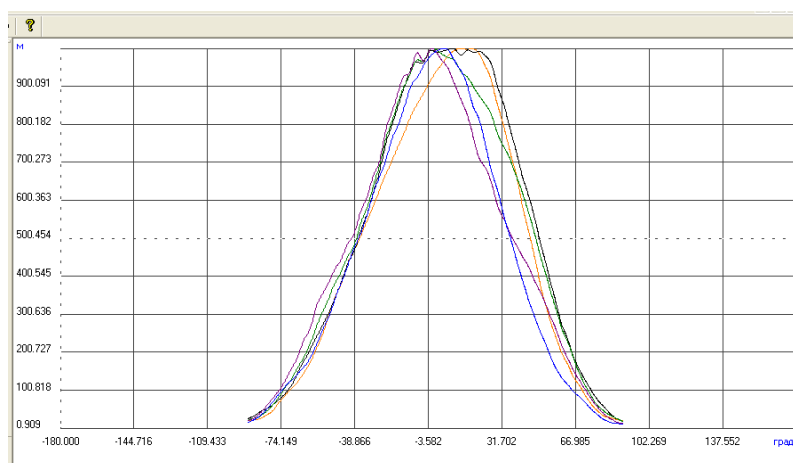


Рис. 10. Диаграммы направленности плоской спиральной антенны с боковым выходом (нижняя часть рабочего диапазона)

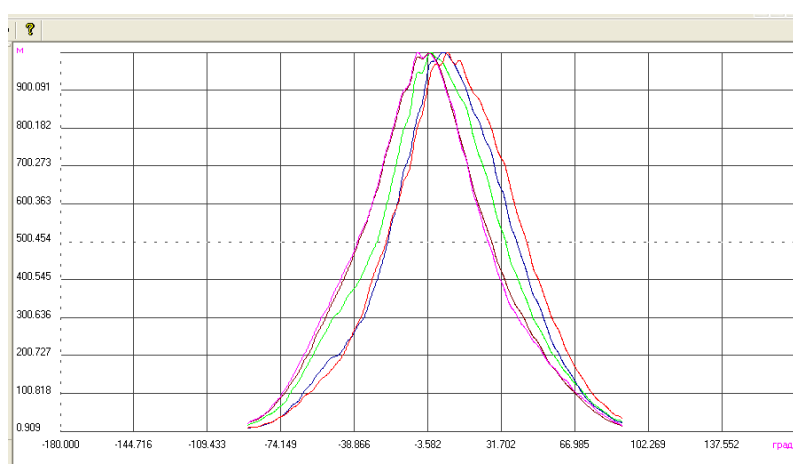


Рис. 11. Диаграммы направленности плоской спиральной антенны с боковым выходом (верхняя часть рабочего диапазона)

Коэффициент усиления был получен методом сравнения с эталонной антенной, график КУ приведен на рис. 12.

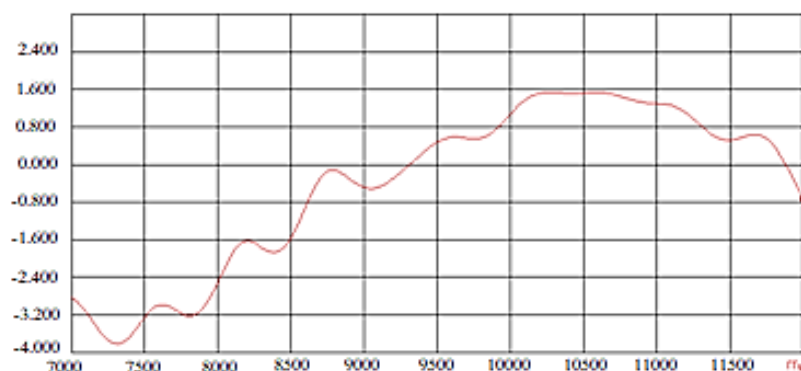


Рис. 12. КУ макета плоской спиральной антенны в рабочем диапазоне частот

Экспериментально полученные характеристики антенны подтвердили возможность получения устойчивого пеленгационного рельефа с требуемой точностью в рабочем секторе угла обзора не менее 60° .

В результате разработки были получены следующие радиотехнические характеристики антенны:

Требуемые РТХ	РТХ в результате моделирования
КСВН, не более 2	1,58
Ширина ДН по уровню 0,5, град:	
-в нижней части диапазона, не ниже 70	72
-в верхней части диапазона, не ниже 70	90
Коэффициент усиления, дБ:	
-в нижней части диапазона, не менее минус 4	минус 4
-в верхней части диапазона, не менее 1	1
Волновое сопротивление, 50 Ом	50

Полученные значения РТХ соответствуют требованиям ТЗ.

В результате проектирования разработано два исполнения плоской спиральной антенны с двумя различными углами выхода питающего кабеля. Оба варианта имеют удовлетворительные расчетные и экспериментальные РТХ и могут быть применены в составе пассивного канала пеленгатора.

Р. И. Зудов, В. А. Сороцкий, Н. А. Треймут, П. С. Тетерин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Российская Федерация

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация. Применение нейронных сетей в радиопередающей технике позволит улучшить энергетические и качественные характеристики этих устройств. В числе основных задач, которые могут быть решены с использованием нейронных сетей, рассмотрены новые принципы реализации антенно-согласующих устройств, устройства управления и мониторинга характеристик радиопередатчика, а также способов снижения нелинейных искажений сигналов.

Ключевые слова: радиопередатчик, нейронная сеть, антенное согласующее устройство, предискажения, управление, мониторинг.

Для цитирования: Зудов Р. И., Сороцкий В. А., Треймут Н. А., Тетерин П. С. Повышение энергетических и качественных характеристик радиопередающего устройства на основе использования нейронных сетей // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 113–115.

R. I. Zudov, V. A. Sorotsky, N. A. Treimut, P. S. Teterin
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

IMPROVING POWER EFFICIENCY AND QUALITY CHARACTERISTICS OF A RADIO TRANSMITTER USING NEURAL NETWORKS

Abstract. The use of neural networks in radio transmitters will improve power efficiency and quality characteristics of these devices. Among the main trends of neural networks applications the article discusses new principles for implementing antenna-matching devices, facilities for radio transmitters' control and monitoring, as well as methods for reducing nonlinear signal distortions.

Keywords: radio transmitter, neural network, antenna-matching device, predistortions, control, monitoring.

For citation: Zudov R. I., Sorotsky V. A., Trejmut N. A., Teterin P. S. Improving power efficiency and quality characteristics of a radio transmitter using neural networks // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 113–115.

Опыт применения нейронных сетей в различных областях техники свидетельствует о высоком потенциале данного инструмента, использование которого открывает возможность для улучшения характеристик достаточно сложных технических устройств. В этой связи актуально оценить перспективные направления использования нейронных сетей в радиопередающей технике.

1. Антенно-согласующие устройства

Для устройств данного типа принципиальное значение имеют такие показатели как время настройки на рабочую частоту и погрешность установки входного импеданса.

В радиопередающих устройствах повышенного уровня мощности (мощные и сверхмощные) настройка осуществляется, как правило, в ручном режиме, на основе итерационного принципа и выполнение требуемых нормативов по времени и качеству зависит от опыта и практических навыков оператора. В случае радиопередающих устройств средней мощности широко используются алгоритмы автоматической настройки либо следящего типа, основанные на последовательном переборе комбинаций подстроечных элементов, либо табличного типа, а также их комбинации. Однако и в этом случае, как показывает практика, далеко не всегда удастся удовлетворить постоянно растущие требования по снижению времени настройки радиопередатчика. Это обусловлено тем, что алгоритмы настройки, основанные на последовательном переборе, обладают очевидным недостатком, связанным с существенными затратами по времени, а ускорение за счет использования производных (методы оптимизации 1-ого и 2-го порядков) из-за «невыраженного» экстремума функции, определяющей качество настройки, может привести к некорректным результатам.

В случае использования нейронных сетей, которые в отличие от алгоритмов последовательного перебора лишены проблем с высокой овражностью и целевых функций и/или наличием нескольких локальных экстремумов, вызванных погрешностями измерения и установки параметров элементов радиопередатчика, время настройки антенно-согласующих устройств может быть существенно снижено. В частности, это может быть особенно заметно, когда настройка осуществляется с помощью вариометров связи, скорость вращения роторов в которых сравнительно невелика.

2. Управление и мониторинг характеристик радиопередатчика

Повышенные требования к отказоустойчивости радиопередающего устройства делают актуальной задачу заблаговременного определения и устранения неисправности в работе аппаратуры. Для этого, в частности, могут быть использованы следующие операции, реализованные с использованием нейронных сетей:

1) предпусковая самодиагностика функциональных модулей радиопередатчика с выдачей команд на автоматическое (без участия оператора) подключение резервных блоков и модулей или, при их отсутствии, сообщения о неисправности;

2) реализация в автоматическом режиме заданной последовательности операций по включению радиопередатчика и его переводу в режим готовности к работе;

3) мониторинг характеристик функциональных модулей в процессе работы, осуществление предиктивного анализа с выдачей в необходимых случаях рекомендаций по сервисному обслуживанию радиопередатчика.

3. Улучшение спектрально состава

При решении данной задачи на нейронные сети могут быть возложены функции принятия решения о необходимости корректировки параметров сигналов с целью улучшения спектрального состава выходного напряжения как на этапе подготовки к включению, так и непосредственно в процессе работы радиопередатчика. Результаты этого анализа в независимости от режима работы усилителя мощности (линейный или ключевой) могут быть использованы для формирования предсказаний входного сигнала. При этом в случае усилителей мощности, работающих в линейном режиме, такие предсказания формируются для компенсации нелинейности вольт-амперных характеристик электронных приборов, а также искажений, возникающих вследствие нелинейных преобразований сигналов.

В случае ключевых усилителей мощности основной проблемой повышения высших гармоник, которую можно устранить с помощью предсказаний, является разброс статических или динамических параметров электронных приборов, а также задержки

распространения сигнала по линиям печатного монтажа. При этом следует особо подчеркнуть, что по сравнению с классическим подходом, основанным на использовании принципов автоматического управления, применение нейронных сетей позволяет заметно сократить затраты времени при решении данного класса задач.

В качестве примера, иллюстрирующего эффективность применения нейронных сетей, можно привести результаты, достигнутые авторами: на основе предсказания импульсов, управляющих работой транзисторов двухтактного усилителя мощности была решена задача снижения уровня второй гармоники до значения не более чем минус 60 дБ при исходном значении - минус 30...40 дБ. Более того при этом выигрыш в снижении уровня третьей гармоники составил порядка 35 дБ. Все это в совокупности позволило снизить требования к избирательности выходных фильтров и уменьшить количество поддиапазонов.

Заключение

Положительный опыт применения нейронных сетей при решении задач улучшения спектрального состава сигналов в радиопередающих устройствах подтвердил их высокую эффективность. Оценку эффективности нейронных сетей при решении других перечисленных задач предполагается осуществить в рамках предстоящих исследований.

Т. Б. Клименко^{1,2}, С. А. Варнаков^{1,2}, А. С. Яценко², С. В. Кривальцевич^{1,2}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)

Омск, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ КВ-ДИАПАЗОНА В ПЕСЧАНОМ ГРУНТЕ

Аннотация. Приведены экспериментальные данные об удельном сопротивлении, удельной проводимости, комплексной диэлектрической проницаемости образца грунта, отобранного вблизи Комсомольского сельского поселения Омской области. Эмпирические данные о диэлектрических и электрофизических характеристиках грунта позволили определить количество и геометрические размеры заземляющих электродов, а также значения высокочастотного и низкочастотного сопротивлений. Полученные результаты найдут применение при разработке рекомендаций по организации заземления мобильных комплексов с учётом реальных характеристик грунта.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, заземление, мобильные комплексы, удельное сопротивление, комплексная диэлектрическая проницаемость.

Для цитирования: Клименко Т. Б., Варнаков С. А., Яценко А. С., Кривальцевич С. В. Особенности заземления мобильных комплексов КВ-диапазона в песчаном грунте // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 116–118.

T. B. Klimenko^{1,2}, S. A. Varnakov^{1,2}, A. S. Yashchenko², S. V. Krivaltsevich^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

Omsk, Russian Federation

GROUNDING MOBILE HF COMMUNICATION COMPLEXES IN SAND

Abstract. The paper presents experimental data on specific resistance, conductivity, complex permittivity of a soil sample taken near the Komsomolsk rural settlement of the Omsk region. Empirical data on the dielectric and electrophysical characteristics of the soil made it possible to determine the number and geometric dimensions of grounding electrodes, as well as the values of high-frequency and low-frequency resistance. The results obtained will find application in developing recommendations for organizing grounding of mobile communication complexes taking into account the actual characteristics of the soil.

Keywords: electromagnetic compatibility, grounding, mobile complexes, resistance, complex permittivity.

For citation: Klimenko T. B., Varnakov S. A., Yashchenko A. S., Krivaltsevich S. V. Grounding mobile HF communication complexes in sand // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 116–118.

В работе рассматриваются электрофизические свойства грунта и оценка его влияния на заземление мобильных комплексов коротковолновой (КВ) связи. Обязательным

условием для корректной работы данных комплексов является обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) мобильных комплексов с источниками помех. Как известно, заземление широко применяют для обеспечения ЭМС за счет снижения уровня наведенных помех. Поскольку эффективность заземления определяется значением удельной проводимости грунта, то исследование электрофизических свойств грунтов и особенностей их применения для заземления мобильных комплексов КВ-связи является актуальной задачей.

Удельное сопротивление ρ , удельная проводимость σ и комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) – электрофизические свойства, определяющие способность грунта отводить токи помех. Низкое удельное сопротивление и КДП, высокая удельная проводимость – оптимальное сочетание для наилучшего отвода токов в грунт.

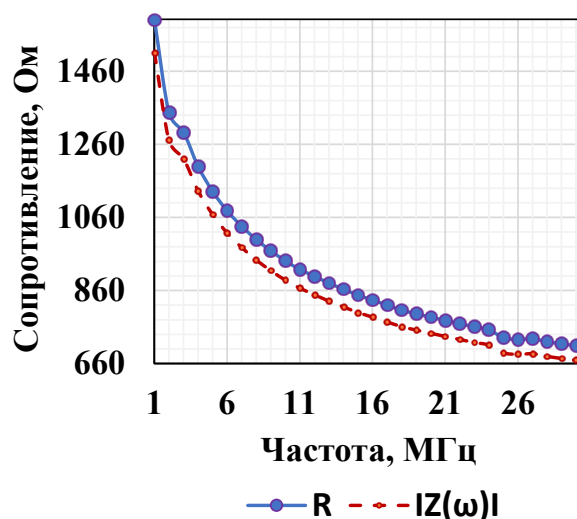
Значение удельного сопротивления изучаемого песчаного грунта значительно возрастает с падением влажности и, согласно справочным данным, может находиться в пределах от десятков до нескольких тысяч Ом·м. Это значит, что влажный песчаный грунт эффективно отводит токи помех, в отличие от сухого.

Образцы песчаного грунта были отобраны в речной долине р. Иртыш в районе Комсомольского сельского поселения Омской области. Электрофизические характеристики образца определялись с помощью значений КДП, лабораторно измеренных коаксиально-волноводным методом. Полученные частотные спектры указывают на то, что удельное сопротивление с уменьшением частоты и влажности повышается, а удельная проводимость снижается. Действительная и мнимая части КДП возрастают с падением частоты и увеличением влажности.

Для проектирования заземляющего устройства выбран заземляющий электрод среднего типоразмера с максимальной величиной заглубления 0,9 м. В расчете использованы значения электрофизических величин при наименьшей частоте наводимых помех 1 МГц и наименьшей оптимальной влажности песка 5 %, что соответствует случаю максимального сопротивления заземляющего электрода. Значения сопротивления R , количество заземляющих электродов, величина заглубления электродов определялись с помощью классического расчета заземляющего устройства по допустимому сопротивлению, а для нахождения сопротивления $|Z(\omega)|$ использовали свойства параметров линии передачи.

При влажности 5 % полученные значения ρ лежат в пределах от 385 до 780 Ом·м. При ρ свыше 500 Ом·м в расчетах сопротивление заземляющего устройства увеличено в $0,002 \cdot \rho$ раз, как это допускают правила устройства электроустановок (ПУЭ-7). При этом значение максимального сопротивления заземляющего устройства не должно превышать десятикратно увеличенного нормируемого сопротивления и равно 43,5 Ом.

На рисунке представлен частотный спектр низкочастотного R и высокочастотного $|Z(\omega)|$ сопротивлений электрода в песчаном грунте.



Низкочастотное R и высокочастотное $|Z(\omega)|$ сопротивления заземляющего электрода в исследуемом песчаном грунте

График зависимости показывает, что заземляющий электрод среднего типоразмера, заглубленный в песчаный грунт, будет эффективно отводить в грунт низкочастотные и высокочастотные токи помех, так как сопротивление $|Z(\omega)|$ не превышает R . Как показал расчет заземляющее устройство должно состоять из 67 заземляющих электродов, заглубленных на 0,9 м.

В результате расчётов, выполненных с привлечением эмпирически определённых диэлектрических и электрофизических характеристик образца почвы, показано, что на песчаном грунте возможно производить заземление мобильных комплексов КВ-связи с учетом ЭМС, но организация соответствующего заземляющего устройства потребует высокой трудоемкости и займет большую площадь. Для обеспечения эффективного снижения уровня помех низкочастотного и высокочастотного характера при развертывании мобильного комплекса КВ-диапазона на песчаном грунте необходимо разместить заземляющее устройство, состоящее из 67 заземляющих электродов.

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

В. В. Костюченко^{1,2}, А. А. Черепанов^{1,2}

¹ООО «СибИС», Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Российская Федерация

МЕТОД ПРОСТОЙ КАЛИБРОВКИ ОШИБОК СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ И УСИЛЕНИЯ ДЛЯ СИГМА-ДЕЛЬТА АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Аннотация. Из-за технологических разбросов и шумов параметры схемы аналого-цифровых преобразователей расходятся с расчётными, что вызывает изменение сигнала за счёт ошибок смещения нуля и усиления. Одним из методов их устранения является калибровка. В работе представлена цифровая калибровка на основе разделенных во времени сумм отсчетов и определения среднего значения усиления. Моделирование подтвердило устранение ошибок смещения нуля и усиления.

Ключевые слова: ошибка смещения нуля, ошибка усиления, аналого-цифровой преобразователь, сигма-дельта модулятор, цифровая калибровка.

Для цитирования: Костюченко В. В., Черепанов А. А. Метод простой калибровки ошибок смещения нуля и усиления для сигма-дельта аналого-цифровых преобразователей // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 119–122.

V. V. Kostyuchenko^{1,2}, A. A. Cherepanov^{1,2}

¹“SibIS” LLC, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

SIMPLE ZERO OFFSET & GAIN ERRORS CALIBRATION METHOD FOR SIGMA-DELTA ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER

Abstract. Due to technological variations and noise, the parameters of analog-to-digital converters differ from the estimated, which causes signal changes due to zero offset and gain errors. One method of eliminating these errors is calibration. This paper presents digital calibration based on time-separated summation of samples and determination of the average gain value. Simulation confirmed the elimination of zero offset and gain errors.

Keywords: zero offset error, gain error, analog-to-digital converter, sigma-delta modulator, digital calibration.

For citation: Kostyuchenko V. V., Cherepanov A. A. Simple zero offset & gain errors calibration method for sigma-delta analog-to-digital converter // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 119–122.

Аналого-цифровые преобразователи переводят аналоговый сигнал в цифровой для последующей обработки. Среди них широкое применение получили интегральные микросхемы сигма-дельта преобразователей, обладающие высокой разрешающей способностью и востребованные в радиотехнике, биомедицине и аудиосистемах.

Упрощенно схема сигма-дельта аналого-цифрового преобразователя состоит из трех основных блоков: усилителя с программируемым коэффициентом усиления, реализующего максимизацию динамического диапазона; дельта-сигма модулятора и децимирующего фильтра. Дельта-сигма модулятор позволяет увеличить отношение сигнал/шум за счет перераспределения шумов квантования и передискретизации. Чтобы

избавить выходной сигнал от шумов квантования в высокочастотной области, должна быть выполнены децимация и низкочастотная фильтрация сигма-дельта модулированных потоков. Фильтр должен выполнять и функцию расширения разрядности относительно выходной разрядности дельта-сигма модулятора для сохранения полученного отношения сигнал/шум.

Из-за технологических разбросов, шумов и частотной зависимости параметров элементов микросхемы возникают ошибки смещения нуля и усиления, которые снижают точность преобразования. Они характерны для разных архитектур и могут возникать в различных функциональных блоках устройства. Для повышения точности применяется калибровка этих ошибок, выполняемая аналоговыми и/или цифровыми методами, как внутри схемы, так и с помощью внешних устройств.

Целью данной работы является разработка простого метода внутренней цифровой калибровки многоканального 16-битного сигма-дельта аналого-цифрового преобразователя. Могут применяться и аналоговые методы калибровки, но они усложняют аналоговую часть преобразователя, а также не позволяют полностью избавиться от ошибок. Поэтому и был выбран цифровой метод, так как он значительно не усложняет тракт аналого-цифрового преобразования. Однако для реализации потребуется дополнительная площадь в топологии микросхемы для памяти/логики. Калибровка выполняется одновременно для всех каналов, но отдельно для ошибок смещения нуля и усиления. Калибровка разделена на два этапа: оценка и корректировка. При оценке производится вычисление ошибки смещения нуля и коэффициентов калибровки ошибок усиления, а при корректировке – применение операций умножения и сложения к выходным сигналам для проведения калибровки с помощью вычисленных коэффициентов.

Схема переводится в особое функциональное состояние, при котором: 1) при калибровке ошибки смещения нуля на дифференциальный вход усилителя с программируемым коэффициентом усиления подается ноль. Идеально это должно давать нулевой сигнал на выходе, но реально появляется ошибка смещения нуля (U_{os}); 2) в случае калибровки ошибки усиления на вход модулятора подается некоторое постоянное опорное напряжение, которое, проходя через усилитель с программируемым коэффициентом усиления, будет умножаться на определенный коэффициент (A_{PGA}), содержащий ошибку ввиду рассогласования параметров элементов усилителя.

Для моделирования использовалась MATLAB-модель дельта-сигма модулятора, которая позволила сгенерировать сигма-дельта модулированный поток, поступающий на цифровой децимирующий фильтр на уровне SystemVerilog. Далее данные поступали на цифровые блоки калибровки, также описанные на SystemVerilog.

Оценка ошибки смещения нуля. После прохождения через преобразователь данные накапливаются за 1024 такта, затем вычисляется среднее значение для повышения точности калибровки. Аналогично обрабатываются остальные каналы, после чего процедура повторяется ещё раз. Итоговое значение для каждого канала получают усреднением двух результатов, что позволяет сделать лучшее усреднение сигнала с шумами.

Оценка коэффициентов ошибок усиления. При оценке коэффициента ошибки усиления на модулятор подается постоянный опорный сигнал, усиленный на заданный коэффициент программируемого усилителя. После преобразователя данные накапливаются за 1024 такта и усредняются. Для всех каналов вычисляются средние значения, затем из них формируется общее опорное значение как среднее среди всех каналов. Индивидуальный коэффициент для каждого канала получается делением опорного значения на его среднее. Для каждого коэффициента усиления должна выполняться отдельная калибровка.

Корректировка ошибок. Корректировка предполагает два этапа: вычитание из выходных данных фильтра значения U_{os} и их умножения на рассчитанный коэффициент $1/A_{PGA}$.

В качестве результатов приводятся графики выходных сигналов для обоих видов калибровки.

Калибровка ошибки смещения нуля. Калибровка выполнялась для напряжения смещения минус 10 мВ с добавлением белого шума с $SNR = 100$ дБПШ/Гц. На рис. 1 представлен график выходного синусоидального сигнала со смещением до и после калибровки. Здесь видно отсутствие ошибки смещения в откалиброванном сигнале.

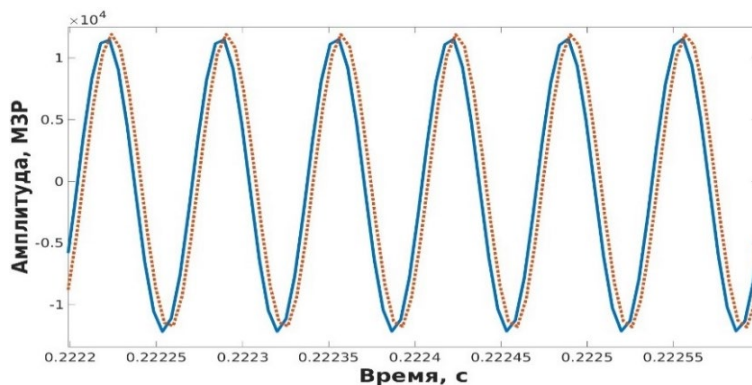


Рис. 1. График выходного синусоидального сигнала со смещением до и после калибровки:
сплошная линия – до калибровки, пунктирная – после калибровки

Калибровка ошибки усиления. Выполнялась калибровка многоканальной схемы, для которой подавались синусоидальные сигналы с ошибками усиления с добавлением белого шума с $SNR = 100$ дБПШ/Гц. На рис. 2 демонстрируется график выходных сигналов каналов с разными ошибками усиления. Из рисунка видно, что происходит усреднение амплитуды к общему уровню для всех сигналов, т.е. все каналы были приведены к одному общему усилению.

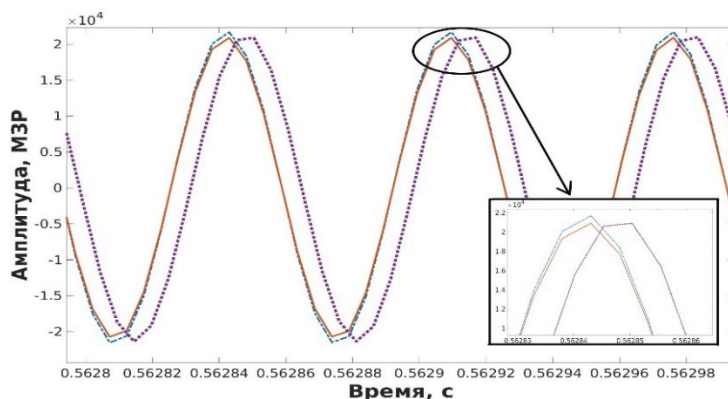


Рис. 2. График выходных сигналов, содержащих ошибки усиления:
сплошная линия – ослабленный сигнал до калибровки,
штрихпунктирная – усиленный сигнал до калибровки,
пунктирная – после калибровки для обоих сигналов

Предложена цифровая калибровка ошибок смещения нуля и усиления. Предложенный метод реализован на уровне SystemVerilog-описания и показал высокую эффективность при моделировании, устраняя ошибки смещения нуля и усиления. Метод отличается простотой и гибкостью интеграции в цифровой тракт без изменений в структуре аналого-цифрового преобразователя. Однако требуются дополнительные площади в топологии интегральной схемы, но они оправданы достигнутым улучшением точности

преобразования. Дальнейшим этапом реализации метода является верификация на основе ПЛИС с использованием ранее разработанной и изготовленной микросхемы дельта-сигма модулятора, а после – реализация в кремнии в составе микросхемы 8-канального сигма-дельта аналого-цифрового преобразователя.

Ю. А. Костычев

Омский научный центр СО РАН (Институт радиопизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

МЕТОД НИЗКОЧАСТОТНОЙ ЕМКОСТНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ

Аннотация. Предложен новый метод обработки результатов емкостных измерений при определении спектров комплексной диэлектрической проницаемости водных растворов солей. Метод отличается от известных аналогов аналитическим решением задачи определения величин активной проводимости и емкости эквивалентной схемы емкостной измерительной ячейки с учетом эффекта двойного электрического слоя. Проведены экспериментальное исследование метода и сравнение его точностных характеристик с оригинальными методами с использованием измерительной ячейки на базе симметричной полосковой линии и раствора соли NaCl концентрации 1 г/л. Показана эффективность применения предложенного метода в восстановлении как действительной, так и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости раствора. Увеличен коэффициент перекрытия диапазона частот проведения измерений в 90 раз при сохранении точности измерений в сравнении с известной методикой.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, измерительная ячейка, емкостные измерения, растворы солей, двойной электрический слой.

Для цитирования: Костычев Ю. А. Метод низкочастотной емкостной диэлектрической спектроскопии водных растворов солей // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 123–125.

Y. A. Kostychov

Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

METHOD OF LOW-FREQUENCY CAPACITIVE DIELECTRIC SPECTROSCOPY OF SALT SOLUTIONS

Abstract. The paper proposes a new method for processing the results of capacitive measurements in determining the spectra of complex dielectric permittivity of aqueous solutions of salts. The method differs from known analogues by its analytical solution to the problem of determining the values of active conductivity and capacitance of the equivalent circuit of a capacitive measuring cell, taking into account the effect of a double electric layer. The author conducted an experimental study of the method and compared its accuracy characteristics with original method using a measuring cell based on a symmetrical strip line and a NaCl salt solution with a concentration of 1 g/l. It is shown that the proposed method is effective in restoring both the real and imaginary parts of the complex permittivity of the solution. The coefficient of overlapping the frequency range of measurements has been increased by 90 times while maintaining the accuracy of measurements in comparison with the known method.

Keywords: complex permittivity, measuring cell, capacitive measurements, salt solutions, electric double layer.

For citation: Kostychov Y. A. Method of low-frequency capacitive dielectric spectroscopy of salt solutions // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 123–125.

Мониторинг состояния водных источников как естественных, так и искусственных является важной задачей, которая решается широко распространенными методами емкостной диэлектрической спектроскопии. В реальных условиях не встречается химически чистая вода, поскольку она содержит растворенные в ней соли, поэтому целесообразным является исследование диэлектрической спектроскопии водных растворов солей.

Емкостные измерения водных растворов солей проводят в измерительных ячейках, которые чаще всего представляют собой отрезки коаксиальной или симметричной полосковой линий. В процессе емкостной диэлектрической спектроскопии определяют действительную ϵ' и мнимую ϵ'' части комплексной диэлектрической проницаемости по активной проводимости g и емкости C области измерительной ячейки, заполненной измеряемым раствором, называемой рабочей. Поэтому основной задачей емкостной диэлектрической спектроскопии является восстановление g и C рабочей области по прямо измеренным ее комплексным проводимости, или импедансу, или коэффициенту отражения.

Для известных оригинальных методов емкостной диэлектрической спектроскопии (использующих $g=G$ и $C=B/\omega$); характерно кажущееся низкочастотное увеличение ϵ' воды с растворенными в ней солями, обусловленное приэлектродными эффектами двойного электрического слоя, осложняет ее достоверные емкостные измерения (см линию крестов на рис.2 б).

Целью доклада стало представление как метода аналитического выражения значений емкости C и активной проводимости g эквивалентной схемы рабочей области измерительной ячейки через измеренные величины ее активной и реактивной проводимостей G и B для корректного определения комплексной диэлектрической проницаемости водных растворов солей, так и результатов его апробации.

Сущность предлагаемого метода заключается в представлении эквивалентной схемы рабочей области измерительной ячейки с учетом приэлектродной емкости двойного электрического слоя C_1 (рис. 1).

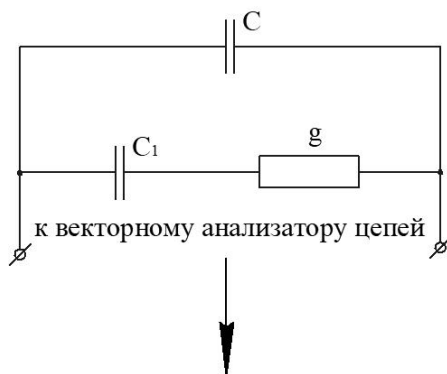


Рис. 1. Эквивалентная схема рабочей области измерительной емкостной ячейки

Аналитически g , C и C_1 могут быть выражены из прямо измеренных с помощью векторного анализатора цепей G , B и характеристической частоты ω_m (которая приходится на максимум тангенса угла диэлектрических потерь, см. рис.2а) с помощью замены $t=g/(\omega C)$. Предлагаемая замена позволяет сформулировать кубическое уравнение на t имеющее единственное действительное решение. Значение C_1 может быть восстановлено из выражения на характеристическую частоту $\omega_m^2=g^2/(2CC_1)$.

Результаты емкостных измерений раствора NaCl 1 г/л с помощью измерительной ячейки на базе симметричной полосковой линии приведены на рис. 2. Прямые измерения проводимостей G, B были выполнены с помощью измерителя иммитанса E7-28 (в низкочастотном диапазоне до 10 МГц) и с помощью портативного анализатора цепей Libre VNA (в высокочастотном диапазоне до 200 МГц).

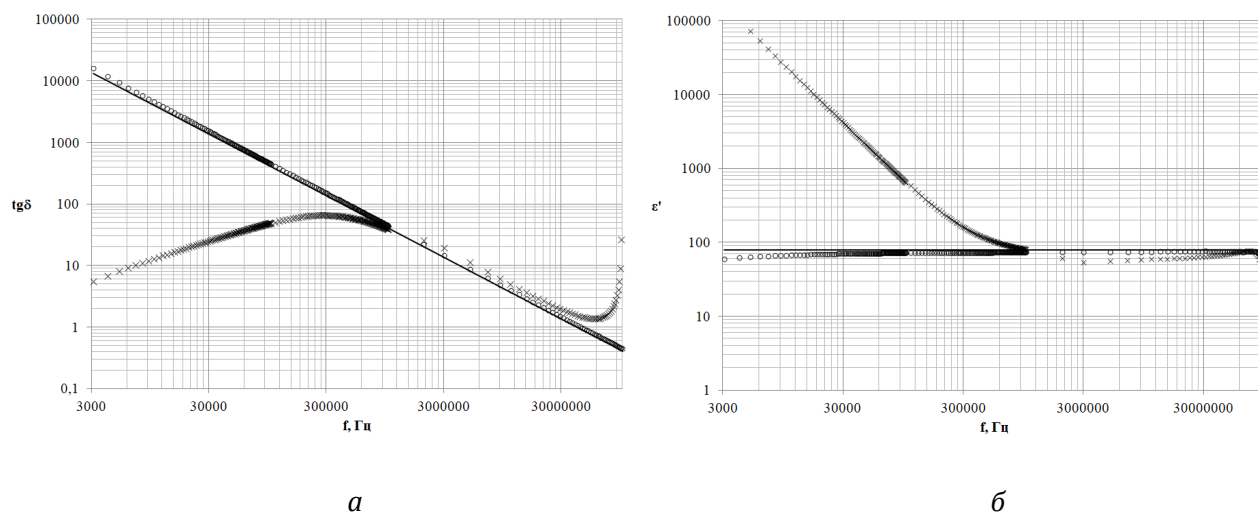


Рис. 2. Результаты измерения водного раствора NaCl 1 г/л: а) тангенс угла диэлектрических потерь, б) действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости:
 сплошные линии – теоретические значения согласно модели Дебая
 (при удельной проводимости $\sigma=0,185$ См/м и $\epsilon'=78$);
 линии крестов – результаты оригинального метода ($g=G$ и $C=B/\omega$);
 линия круглых маркеров – предлагаемый метод

Предложенный метод позволяет проводить достоверные измерения (с погрешностью в 6% для действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и 9% для тангенса угла диэлектрических потерь) в диапазоне от $1,5 \times 10^5$ до $1,5 \times 10^8$ Гц. Оригинальный метод обеспечивает соответствующую точность измерений в диапазоне от $9,0 \times 10^5$ до 1×10^7 Гц. Что позволяет говорить о возможности расширения рабочего диапазона измерений в 90 раз (по коэффициенту перекрытия: отношения верхней рабочей частоты к нижней) при применении предлагаемого метода.

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

К. А. Майненгер^{1,2}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)

Омск, Российская Федерация

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО СОГЛАСУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ НЕСИММЕТРИЧНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИБРАТОРА

Аннотация. Представлены результаты проектирования широкополосного согласующего устройства, предназначенного для совместной работы с несимметричным вертикальным вибратором. Проведено численное моделирование разработанного широкополосного согласующего устройства с использованием программ, а также приведены экспериментальные измерения при работе его как на эквивалент антенны, так и на реальную антенну. Особое внимание уделено проверке его работоспособности в реальных условиях эксплуатации. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного решения и пригодность для практического применения в радиотехнических системах.

Ключевые слова: КВ-диапазон, широкополосное согласование, широкополосное согласующее устройство, антенна штыревая.

Для цитирования: Майненгер К. А. Результаты проектирования широкополосного согласующего устройства для несимметричного вертикального вибратора // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 126–129.

К. А. Maynenger^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

Omsk, Russian Federation

RESULTS OF DESIGNING A BROADBAND MATCHING DEVICE FOR AN ASYMMETRIC VERTICAL VIBRATOR

Abstract. The paper presents the results of designing a broadband matching device intended for use with an asymmetric vertical vibrator. A numerical simulation of the developed broadband matching device has been performed using software, and experimental measurements have been performed when operating on both an equivalent antenna and a real antenna. Special attention is paid to checking its operability in real operating conditions. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed solution and its suitability for practical use in radio engineering systems.

Keywords: HF band, broadband matching, broadband matching device, pin antenna.

For citation: Results of designing a broadband matching device for an asymmetric vertical vibrator // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 126–129.

Частотная зависимость входного сопротивления антенны выражена тем сильнее, чем меньше ее электрические размеры, и оказывается тем сложнее, чем сложнее ее конфигурация. Антенны больших размеров могут быть сделаны почти апериодическими,

т.е. имеющими частотно-независимое входное сопротивление, которое достигается ценой увеличения громоздкости и сложности устройства. Последнее обстоятельство особенно неприемлемо для носимых радиостанций или мобильных аппаратных, с ограниченным временем развертывания. Поэтому одним из типов антенн, используемых в таких комплексах, являются несимметричные вертикальные вибраторы, электрическая длина которых обычно не превышает 4 метров. Для согласования входного сопротивления антенны с радиопередающим оборудованием в состав такой схемы необходимо включать устройство, которое бы выполняло функцию согласования сопротивления нагрузки (антенны) с сопротивлением источника сигнала. В зависимости от полосы, в которой необходимо обеспечить согласование, согласующие устройства можно разделить на два типа – узкополосные и широкополосные. Узкополосное согласование хотя и обеспечивает меньшие потери в согласующем контуре, но не обеспечивает возможность работы в режимах, требующих быструю смену номинала рабочей частоты, поэтому в работе рассмотрены результаты проектирования широкополосного согласующего устройства (ШСУ).

Методика проектирования ШСУ произведена по следующему алгоритму. В работе при проектировании ШСУ использована несимметричная вертикальная вибраторная антенна, высотой 4 метра (далее антенна АШ-4,0). В качестве исходных данных при проектировании использованы натурно измеренные зависимости входного сопротивления антенны АШ-4,0 от частоты. Рабочий диапазон частот антенны АШ-4,0 разбивался на ряд частотных участков, в рамках которых, для каждого из них сначала рассчитывались элементы эквивалента нагрузки, затем определялась резонансная и среднегеометрическая частота. В зависимости от того, какой знак (больше или меньше) принимала резонансная частота относительно среднегеометрической в состав схемы включалась дополнительная индуктивность или емкость. С учетом дополнительного элемента рассчитывалась добротность цепи нагрузки и для конечного числа элементов определялась предельная степень согласования. По известным формулам были вычислены значения элементов схемы и коэффициента трансформации. При необходимости ухода от моточных изделий допускалось пересчитать идеальный трансформатор в сечении схемы, путем замены Г-образного звена. Далее все схемы ШСУ для каждого частотного диапазона были подвержены имитации в программе проектирования высокочастотных цепей. Выходными данными являлись S -параметры в координатах диаграммы Вольперта – Смита. Графический пример результата расчета одной из таких схем приведены на рис. 1.

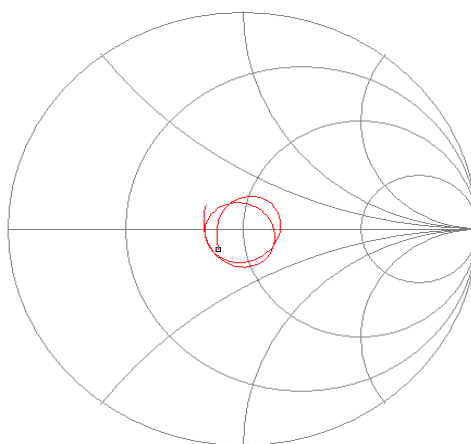


Рис. 1. Параметр S_{11} схемы согласующей цепи для одного из частотных участков

Аналогичным образом были верифицированы схемы остальных частотных диапазонов. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что проектируемое ШСУ позволяет согласовать антенну АШ-4,0 в заданном диапазоне частот с коэффициентом стоячей волны (КСВ) не превышающем значение 5. С учетом проведенного аналитического расчета и верификации его с помощью программных продуктов, подтвердивших правильность схмотехнических решений, был создан макет ШСУ. Конструктивно макет ШСУ представлял собой узел печатный, с размещенными на нем – элементами широкополосного согласующего контура, рассчитанными по описанной ранее методике; контактами для подключения приемопередатчика и антенны; механическими тумблерами для управления.

Также с целью проверки работоспособности макета была проведена серия лабораторных и натурных экспериментов. В рамках лабораторных испытаний спроектированный макет ШСУ проверялся по двум критериям. Первое это обеспечение требования по КСВ для каждого частотного диапазона при работе на эквивалент антенны (ЭА) АШ-4,0. Второе – измерение уровня мощности сигнала с выхода ШСУ. Лабораторные измерения макета ШСУ показали правильность схмотехнических решений, результаты, полученные на этом этапе положительные и удовлетворяют заданным требованиям (в части КСВ), уровни мощности сигнала с выхода ШСУ также считаются положительными, т.к. либо превышали, либо не сильно уступали со сравниваемые типами других согласующих устройств. На основании чего в дальнейшем были проведены натурные испытания макета ШСУ при работе в реальных условиях. При работе в реальных условиях эксплуатации и на реальную антенну, спроектированный макет ШСУ также подтвердил свою работоспособность, как в части КСВ, так и в части эффективности относительно других типов согласующих устройств. Пример сравнительного измерения уровней сигнала в точке приема при работе на передачу антенны АШ-4,0 с другими типами согласующих устройств, приведен на рис. 2.

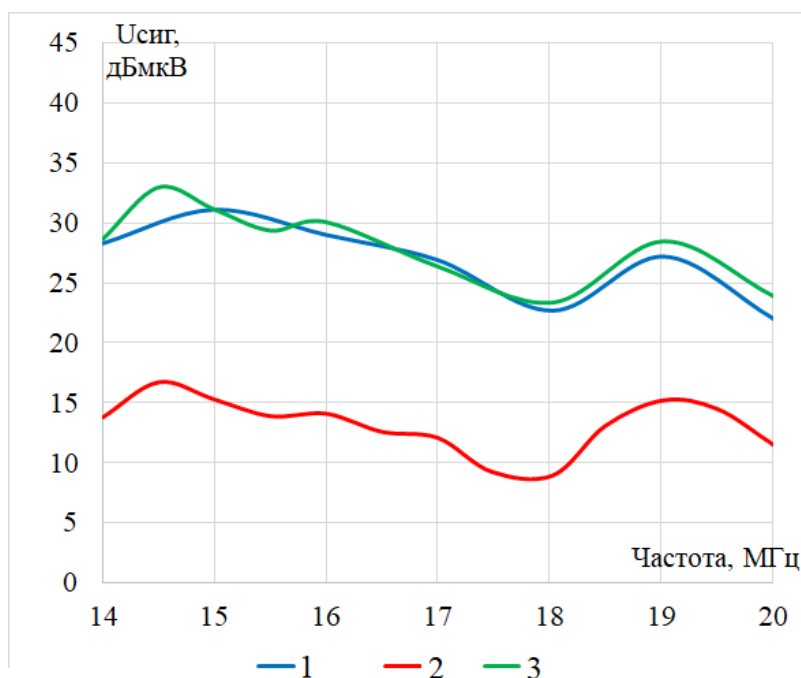


Рис. 2. График зависимостей уровня сигнала в точке приема от частоты для одного из частотных участков:
1 – макет ШСУ, 2 – трансформатор на магнитной связи,
3 – узкополосное согласующее

Результаты эксперимента показали, что в низкочастотной области по эффективности макет ШСУ также превосходит значения, получаемые при работе с согласующим трансформатором, выполненным как трансформатор с магнитной связью на величину в среднем от 1,85 до 7,67 дБ в зависимости от частоты и частотных участков, но уступает узкополосному согласующему на величину в среднем от 3,25 до 9,85 дБ, что обосновывается тем, что в низкочастотной области (до 10 МГц) для обеспечения возможности согласования в заданных частотных участках введены дополнительные элементы, позволяющие снизить добротность цепи нагрузки. В остальной области рабочего диапазона (начиная с 10 МГц) спроектированный макет ШСУ уступает узкополосному согласующему лишь на величину, не превышающую 0,7–2,2 дБ.

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

Ю. М. Мелёшин

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
Зеленоград, Москва, Российская Федерация

ДЕРЕВО АГРЕГАЦИИ ФУНКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА БАЗЕ ЧАСТИЧНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Аннотация. Описан процесс построения дерева агрегации пространственной функции неопределённости, которая строится в радиолокаторе с множественным входом и множественным выходом с кодовым разделением каналов за счет частичной корреляции принятых сигналов с исходными модулирующими последовательностями. Показан способ формирования полного дерева агрегации со сложным корреляционным вычислением только нижнего уровня и получением остальных уровней за счет операций сложения.

Ключевые слова: радиолокатор, кодовое разделение, виртуальная антенная решетка, селекция движущихся целей, частичная кросс-корреляция, дерево агрегаций.

Для цитирования: Мелёшин Ю. М. Дерево агрегации функции неопределенности на базе частичной корреляции последовательностей // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 130–131.

Y. M. Meleshin

National Research University of Electronic Technology
Zelenograd, Moscow, Russian Federation

AGGREGATION TREE OF THE AMBIGUITY FUNCTION BASED ON PARTIAL SEQUENCE CORRELATION

Abstract. The paper describes the process of constructing an aggregation tree of the spatial ambiguity function, which is constructed in a multiple-input, multiple-output code-division multiplexing radar by partially correlating the received signals with the original modulating sequences. A method is shown for forming a complete aggregation tree with a complex correlation calculation of only the lower level and obtaining the remaining levels by adding operations.

Keywords: radar, code division, virtual antenna array, moving target selection, partial cross-correlation, aggregation tree.

For citation: Meleshin Y. M. Aggregation tree of the ambiguity function based on partial sequence correlation // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 130–131.

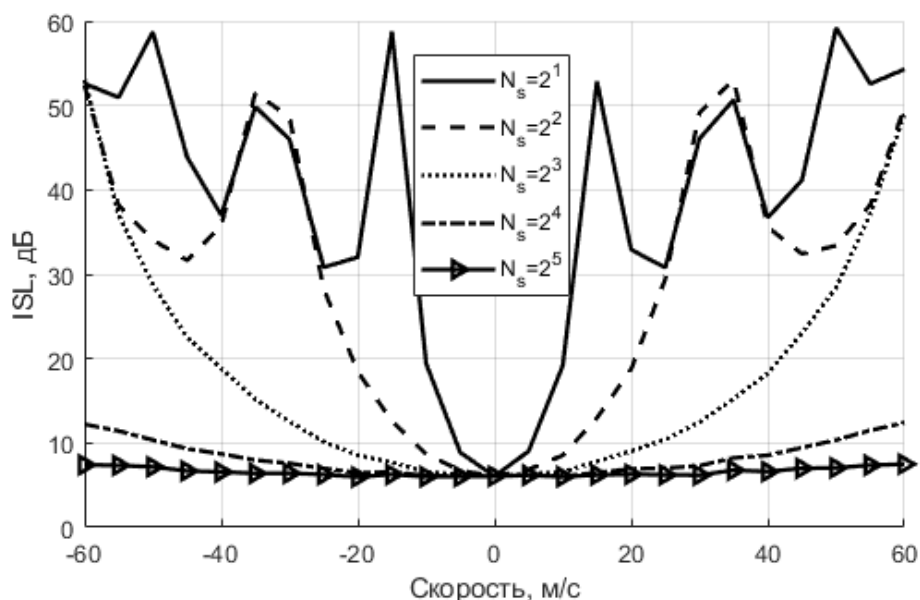
Актуальными являются исследования и разработка радиолокационных систем на базе технологии множественного входа и множественного выхода для охраны и контроля периметра объектов критической инфраструктуры. В настоящей работе рассматриваются такой тип радиолокаторов с кодовым разделением каналов, при котором ортогональность передающих сигналов обеспечивается за счёт использования уникальных псевдослучайных последовательностей для каждого передатчика.

Цель работы – разработать подход к формированию пространственной функции неопределенности, который позволил бы гибко настраивать её ключевые характеристики уже после проведения измерений, на этапе цифровой обработки сигналов. Сам подход строится на вычисление полного дерева агрегации пространственной функции

неопределенности, для этого на каждом передающем канале генерируется длинная последовательность, соответствующая полному времени зондирования. После приёма откликов от целей в процессе цифровой обработки сначала вычисляется нижний уровень дерева агрегации (соответствует самому большому числу разбиений исходной последовательности) с помощью частичной кросс-корреляции. Затем за счет рекуррентной обработки снизу-вверх, используя только операции сложения, можно быстро вычислить все остальные уровни дерева агрегации.

Этот подход устраняет жёсткую зависимость от заранее заданной частоты повторения импульсов, что характерно для классических систем. В результате появляется возможность гибко варьировать параметры обработки, такие как диапазон однозначно измеряемых скоростей и разрешающая способность, уже после получения сырых данных, что значительно расширяет адаптивность радиолокационной системы.

Для апробации предложенного подхода была построена математическая модель и проведено математическое моделирование данного подхода, получены зависимости интегрального (см. рис.) уровня боковых лепестков пространственной функции неопределенности в зависимости от радиальной скорости цели для всех уровней дерева агрегации (в данном случае 5 уровней), в качестве модулирующей последовательности используется последовательность Лежандра длиной 8191 символов, символьная частота исходной последовательности – 10 МГц, центральная частота – 24,15 ГГц.



Интегральный уровень боковых лепестков

Как видно из представленных данных, только на 2 нижних уровнях дерева агрегации отсутствуют искажения функции неопределённости, связанные с Допплеровским смещением из-за радиальной скорости цели. Обработка полного дерева агрегации позволяет гибко выбирать режим детектирования в зависимости от режима работы радиолокатора, возможна реализации как определения пикового значения функции неопределённости, так и взвешенной суммы различных уровней агрегации. Также стоит заметить, что нижние уровни дерева агрегации будут демонстрировать хорошую устойчивость к искажению свойств сигнала из-за Допплеровского смещения частоты, тогда как более высокие уровни будут обладать большим динамическим диапазоном и энергетической эффективностью.

Д. М. Меньшиков, В. Т. Дмитриев

Рязанский государственный радиотехнический университет
Рязань, Российская Федерация

СОЗДАНИЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ КОДИРОВАНИЯ РЕЧИ С НИЗКОЙ СКОРОСТЬЮ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Аннотация. В большинстве современных систем кодирования речи с низкой скоростью передачи данных используются методы распознавания и синтеза речи на основе скрытой Марковской модели. Это позволяет передать информацию сегмент за сегментом, что снижает скорость передачи данных. Однако кодер, основанный на распознавании фонемной речи, может создавать всплески сегментарных ошибок. Кодирование речи на основе скрытой Марковской модели приводит к прерывистости речи и неестественным звуковым артефактам. Предлагается новая система кодирования речи, основанная на нейронных сетях, для сквозного анализа и синтеза речи без использования скрытой Марковской модели.

Ключевые слова: нейронная сеть, глубокие нейронные сети, скрытая Марковская модель.

Для цитирования: Меньшиков Д. М., Дмитриев В. Т. Создание глубоких нейронных сетей для кодирования речи с низкой скоростью передачи данных // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 132–134.

D. M. Menshikov, V. T. Dmitriev

Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russian Federation

CREATING DEEP NEURAL NETWORKS FOR LOW-SPEED SPEECH CODING

Abstract. Most modern low-bit-rate speech coding systems use hidden Markov model-based speech recognition and synthesis techniques. This allows information to be transmitted segment by segment, which reduces the bit rate. However, a phoneme-based coder can create spikes of segmental errors. Hidden Markov model-based speech coding leads to speech discontinuity and unnatural sound artifacts. In this paper, we propose a new speech coding system, a neural network-based approach for end-to-end speech analysis and synthesis without using a hidden Markov model.

Keywords: neural network, deep neural networks, hidden Markov model.

For citation: Menshikov D. M., Dmitriev V. T. Creating deep neural networks for low-speed speech coding // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 132–134.

С начала 1990-х годов Международный союз электросвязи активно занимается стандартизацией речевых кодеров, работающих на низких битрейтах, что стало важным шагом в области цифровой связи. В 1994 году началась работа по созданию стандартов для кодеров, способных передавать речь со скоростью менее 4000 бит/с. Однако, несмотря на значительный прогресс, задача достижения высокого качества речи во всех условиях остаётся сложной. Качество речи зависит от множества факторов, включая разборчивость, чистоту звучания и узнаваемость диктора. Для решения проблемы передачи речи на низких битрейтах (в диапазоне от 200 до 500 бит/с) было предложено использовать параметрическое кодирование. Этот подход основан на парадигме распозна-

вания и синтеза, что позволяет более эффективно использовать доступные ресурсы. Параметрические методы кодирования обладают рядом преимуществ, включая лучшие адаптационные свойства и меньший объем занимаемой памяти. Однако, несмотря на эти достоинства, большинство современных систем, основанных на скрытой Марковской модели, имеют сложную конструкцию, что затрудняет их внедрение и использование.

Фонетические кодеры, используемые в автоматическом распознавании речи, включают в себя скрытую Марковскую модель, языковые модели и модули инкрементального поиска. Эти компоненты работают совместно, чтобы обеспечить точное распознавание речи. Аналогично, фонетические декодеры требуют наличия скрытой Марковской модели, а также систем синтеза речи, которые могут обрабатывать потоковые данные. Тем не менее в последние годы наблюдается значительный переход от традиционных методов, основанных на скрытой Марковской модели, к более современным подходам, использующим глубокие нейронные сети. Это связано с тем, что концепция использования нейронных сетей для распознавания речи не является новой, однако недавние достижения в области вычислительных технологий и доступность больших объемов речевых данных значительно повысили интерес к этой теме.

Глубокие нейронные сети обладают уникальной способностью создавать нелинейные отображения между входными и выходными характеристиками, что невозможно достичь с помощью традиционных методов, таких как смешанная гауссовская модель, используемая в скрытых Марковских моделях. Это делает нейросеть более подходящими для моделирования сложных речевых сигналов. В результате, подходы на основе глубоких нейронных сетей продемонстрировали значительно более высокую производительность по сравнению с традиционными моделями.

Современные достижения в области нейросетевых технологий стали возможны благодаря ряду факторов, которые кардинально изменили подходы к обработке речи и синтезу звуковых сигналов. Важнейшими из них являются:

1. Увеличение объёмов данных: доступ к огромным массивам речевых данных, собранных из различных источников, стал основой для обучения нейронных сетей. Эти данные позволяют моделям лучше понимать и воспроизводить человеческую речь, учитывая множество нюансов и акцентов.

2. Рост вычислительной мощности: прорывы в области вычислительных технологий, особенно в производительности графических процессоров, обеспечили возможность обрабатывать большие объемы данных за короткое время. Это особенно важно для сложных моделей глубокого обучения, которые требуют значительных вычислительных ресурсов.

3. Совершенствование алгоритмов: разработка новых алгоритмов машинного обучения и методов предобучения нейронных сетей позволила значительно улучшить качество моделей. Нейронные сети теперь способны эффективно обрабатывать сложные зависимости между входными и выходными параметрами, что делает их более подходящими для задач синтеза речи.

4. Гибкость и самообучение: одним из ключевых преимуществ глубоких нейронных сетей перед традиционными скрытыми Марковскими моделями является их способность к самообучению на больших массивах данных. Это позволяет моделям адаптироваться к различным условиям и шумам.

Глубокие нейронные сети обладают рядом преимуществ, которые делают их более эффективными в задачах синтеза речи по сравнению со скрытой Марковской моделью. Нейросети способны эффективно выявлять и моделировать нелинейные зависимости между входными данными (например, текстом) и выходными (звуковыми сигналами). Нейросети могут одновременно учитывать несколько факторов, влияющих на качество

синтеза речи, что позволяет получать более естественные и гармоничные звуковые выходы. Современные модели могут адаптироваться к различным акустическим условиям, что делает их более устойчивыми к фоновым шумам и другим искажениям.

Скрытая Марковская модель не справляется с моделированием сложных зависимостей в пространстве признаков, что приводит к недостаточной точности синтеза речи. Проблемы с обработкой фрагментированных обучающих данных ограничивают возможности скрытой Марковской модели в создании естественных речевых паттернов. Скрытая Марковская модель часто требует создания больших и сложных деревьев решений, что усложняет процесс и снижает эффективность. Из-за этих ограничений нейронные сети становятся доминирующим подходом в области синтеза речи, обеспечивая значительные улучшения в качестве и естественности звучания.

В области кодирования речи нейросети также находят широкое применение. Появление новых поколений аппроксимирующих кодеров, основанных на нейросетях, направлено на улучшение качества передачи данных. Нейросетевые подходы позволяют значительно повысить качество передаваемого речевого сигнала. Современные алгоритмы оптимизируют процессы кодирования, что делает их менее ресурсоемкими. Нейросети обеспечивают более высокую эффективность сжатия, что особенно важно для мобильных и интернет-приложений.

Современные тенденции в развитии нейросетевых технологий указывают на несколько ключевых направлений:

1. Совершенствование алгоритмов глубокого обучения: постоянное улучшение существующих алгоритмов и разработка новых подходов к обучению моделей.
2. Интеграция различных методов: смешивание различных подходов к обработке речи для достижения лучших результатов.
3. Обработка в условиях шума: разработка более устойчивых к шуму моделей, что позволит улучшить качество синтеза речи в сложных акустических условиях.
4. Оптимизация энергопотребления: создание более эффективных систем, которые потребляют меньше энергии, что особенно актуально для мобильных устройств.
5. Создание более естественных интерактивных систем: разработка технологий, позволяющих создавать естественные диалоги с пользователями, что откроет новые горизонты в области взаимодействия человека и машины.

Таким образом, нейросетевые технологии продолжают развиваться и трансформировать подходы к синтезу речи и кодированию, обеспечивая более высокое качество и гибкость в обработке звуковых сигналов.

К. В. Немчанов, А. С. Яценко

Омский научный центр СО РАН (Институт радиоп физики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГОПЕРЕНОСА В ПОЧВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПЕНМАНА-МОНТЕЙТА ДЛЯ РАСЧЕТА ИСПАРЕНИЯ

Аннотация. Представлена комплексная математическая модель влагопереноса в почве, интегрирующая метод Пенмана-Монтейта для расчета эвапотранспирации. Модель учитывает основные физические процессы: перенос влаги под действием градиентов влажности и температуры, капиллярные, а также сорбционные силы. Для расчета потенциального испарения реализован алгоритм на основе руководства FAO-56.

Ключевые слова: подстилающая поверхность, диэлектрическая проницаемость, движение почвенной влаги, эвапотранспирация.

Для цитирования: Немчанов К. В., Яценко А. С., Моделирование влагопереноса в почве с использованием метода Пенмана-Монтейта для расчета испарения // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 135–137.

K. V. Nemchanov, A. S. Yashchenko

Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

SOIL MOISTURE TRANSFER MODELING USING THE PENMAN-MONTEITH METHOD FOR EVAPORATION ESTIMATION

Abstract. The paper presents a comprehensive mathematical model of soil moisture transfer, integrating the Penman-Monteith method for evapotranspiration calculation. The model accounts for key physical processes: moisture transport driven by humidity and temperature gradients, capillary forces, and sorption forces. An algorithm based on the FAO-56 guidelines has been implemented to estimate potential evaporation.

Keywords: underlying surface, dielectric permittivity, soil moisture movement, evapotranspiration.

For citation: Nemchanov K. V., Yashchenko A. S. Soil moisture transfer modeling using the Penman-Monteith method for evaporation estimation // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 135–137.

Точное прогнозирование состояния подстилающей поверхности является важной задачей для анализа эффективности антенных систем декаметрового диапазона. Диаграмма направленности и коэффициент усиления таких антенн, как правило, располагаемых в непосредственной близости к земле, в значительной степени определяются диэлектрическими свойствами почвы, которые напрямую зависят от её объемной влажности. Суточные и сезонные вариации влагосодержания в пределах скин-слоя почвы вызывают заметное изменение её радиоп физических характеристик, в частности, комплексной диэлектрической проницаемости. Однако влияние этих динамических эффектов редко учитывается при решении прикладных задач излучения и распространения радиоволн. Разработка модели, способной прогнозировать распределение влажности на основе метеоданных, позволит установить корректную связь между погодными условиями,

влажностью почвы и, как следствие, характеристиками антенны, что повысит точность проектирования и оперативного прогнозирования работы радиосистем.

Для моделирования динамики влажности процесс влагопереноса описан дифференциальным уравнением Ричардса (модифицированное уравнение Дарси), учитывающим капиллярную проводимость и влагопроводность почвы как функции влажности, с учетом сорбционных процессов для низких значений влажности. В качестве начального условия задан равномерный профиль объемной влажности по всей глубине моделирования, равный 20%. Испарение с поверхности почвы описано при помощи метода Пенмана-Монтейта (FAO-56) для почасового расчета эталонной эвапотранспирации (ET_0), которая используется как верхнее граничное условие для потока влаги. При расчете ET_0 используются реальные часовые метеорологические данные, что позволяет моделировать суточную динамику испарения, являющуюся движущей силой процесса высыхания почвы.

Для обработки метеоданных применена кубическая сплайн-интерполяция ввиду ограничения численного метода, требующего расчета с малым шагом по времени (рис. 1).

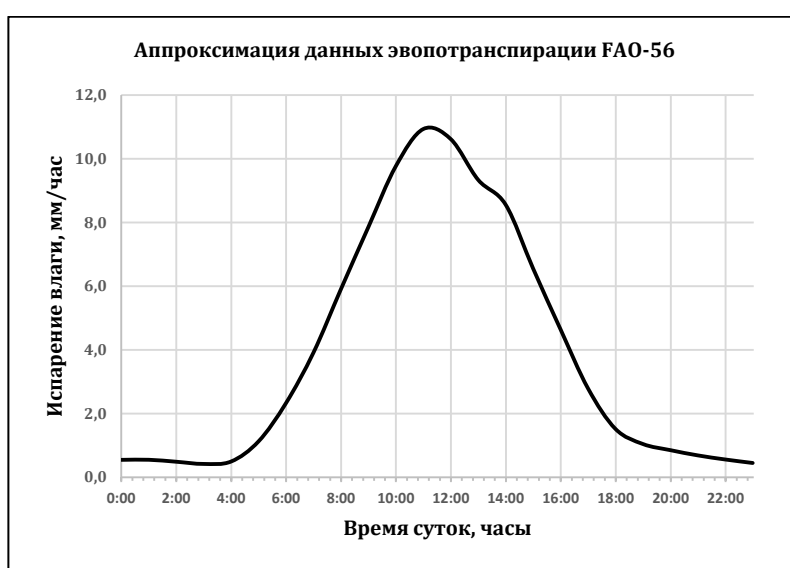


Рис. 1. График суточного изменения эвапотранспирации, интерполяция кубический сплайн

Метод Пенмана-Монтейта учитывает множество входных метеоданных таких как, скорость ветра, температуру воздуха, солнечную радиацию, атмосферное давление, влажность воздуха. Данные по метеопараметрам можно получить из открытых источников, таких как база Всемирного центра радиационных данных ВМО (ГГО им. Воейкова, 2024). Для моделирования системы использовались статистические почасовые данные солнечной радиации по Подмоскovie за июнь 2024 года.

Для численного решения уравнения влагопереноса была разработана явная конечно-разностная схема. Почвенный столб дискретизирован по глубине с шагом 1 см, что позволяет детально описать формирование профиля влажности. Для обеспечения устойчивости решения использован малый шаг по времени.

Для анализа адекватности модели был проведен сравнительный расчет процесса высыхания равномерно увлажненного почвенного профиля при двух различных подходах к заданию испарения: модель на реальных данных и модель на имитированных данных, где испарение задается по синусоидальному закону, аппроксимирующему суточный ход с максимумом в полуденные часы и минимумом ночью (данный подход публиковался ранее в работах автора). На (рис. 2.) представлены результирующие профили

влажности, полученные по истечении одних и пяти суток моделирования.

Наблюдается ожидаемое уменьшение влажности в поверхностном слое с течением времени. Обнаружено существенное расхождение между моделями в краткосрочной перспективе: после первых суток верхний слой почвы (0-1 см) в модели с реальными данными высох до 16%, тогда как в модели с синусоидальным испарением - до 10%. Это свидетельствует, что упрощенная синусоидальная модель значительно переоценивает интенсивность испарения в пиковые часы. В долгосрочной перспективе (5 суток) профили влажности сходятся из-за использования повторяющегося суточного цикла метеоданных и схожей интегральной величины испарения.

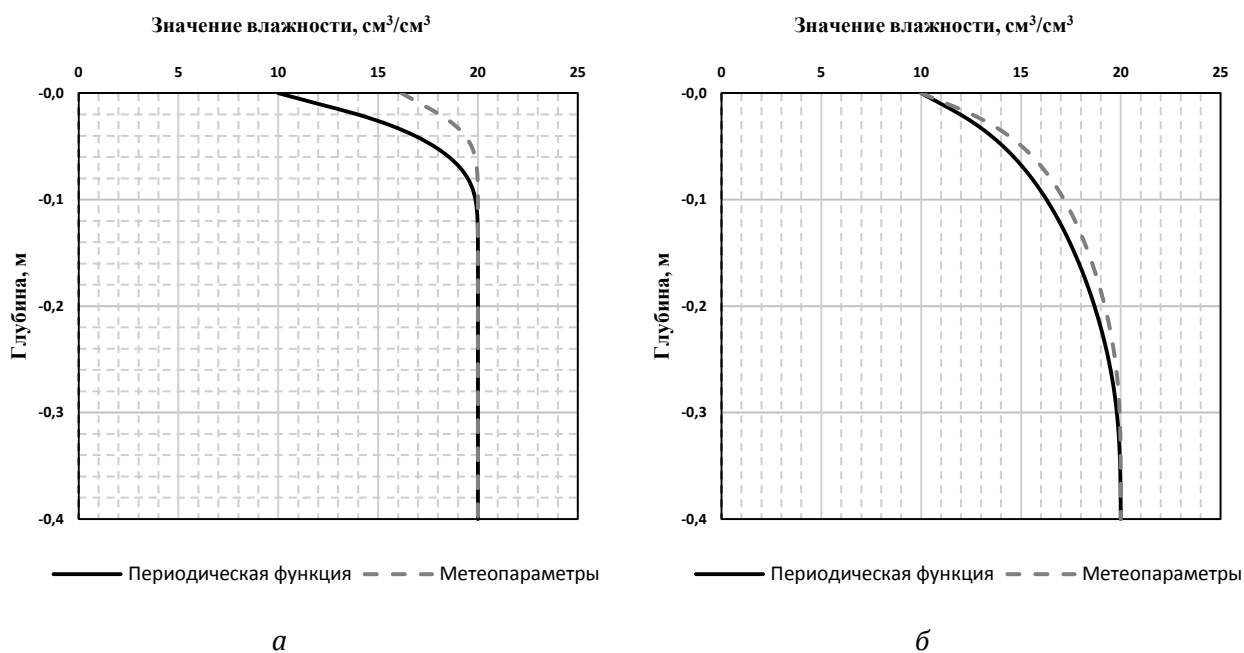


Рис. 2. Профиль объемной влажности: а) спустя 1 сутки после начала процесса испарения, б) спустя 5 суток после начала процесса испарения

Полученные результаты подчеркивают важность использования реальных метеорологических данных для задач, требующих высокой точности прогнозирования мгновенного состояния приповерхностного слоя почвы. Для антенных систем, критически зависящих от диэлектрических свойств поверхности, краткосрочные вариации влажности могут значительно влиять на параметры в конкретный момент времени. Модель является основой для создания программного комплекса, связывающего метеопараметры с радиотехническими характеристиками наземных антенн.

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

В. В. Огуенко

Казанский федеральный университет, Институт физики
Казань, Российская Федерация

СИСТЕМА РАДИОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ИДЕНТИФИКАЦИИ БВС

Аннотация. Беспилотные воздушные средства/суда сегодня представляют собой главный источник разносторонних исследований, что определяется различными процессами, связанными как с развитием науки и техники, так и с международной обстановкой. Ключевым вопросом, который рассматривается отечественными специалистами, является безопасность. Отсюда проистекает актуальность изучения возможностей радиофизического мониторинга, который дает дополнительные стимулы предупреждения наступления опасности. Рассматривается существующая система мониторинга и идентификации беспилотников с уклоном в возможности радиофизики.

Ключевые слова: беспилотные воздушные средства/суда (БВС), мониторинг, радиофизика, идентификация, алгоритм распознавания, радиомониторинг.

Для цитирования: Огуенко В. В. Система радиофизического мониторинга и идентификации БВС // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 138–140.

V. V. Oguenko

Kazan Federal University, Institute of Physics, Kazan, Russian Federation

SYSTEM FOR RADIOPHYSICAL MONITORING AND IDENTIFICATION OF AERIAL VEHICLES

Abstract. Unmanned aerial vehicles/crafts are today the main source of diverse research, which is determined by various processes related to the development of science and technology, as well as the international situation. The key issue considered by domestic specialists is safety. This is why it is important to study the possibilities of radiophysical monitoring, which provides additional incentives for preventing and mitigating risks. This paper examines the existing system for monitoring and identifying drones, focusing on the capabilities of radiophysics.

Keywords: unmanned aerial vehicles/craft (UAVs), monitoring, radiophysics, identification, recognition algorithm, radio monitoring.

For citation: Oguenko V. V. System for Radiophysical Monitoring and Identification of Aerial Vehicles // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 138–140.

На современном этапе применение беспилотных воздушных средств/судна является проблемой, распространённой и влекущей множество задач. Так, все чаще поднимаются вопросы безопасности, возможностей применения как в военных, так и в мирных целях. При этом последнее сталкивается с рядом препятствий, так как наблюдается слишком большая активность среди военизированной техники. Потому, исследователи поднимают темы мониторинга и идентификации БВС, с целью предотвращения возможных потерь среди эксплуатируемой техники.

Варианты удалённого мониторинга и идентификации летательных аппаратов во многом зависят от используемых программ и систем. Разработчикам и производителям

приходится обращаться к инновациям, и важно сформировать представление об их достоинствах и недостатках.

С этой целью проверяются различные алгоритмы и системы информационного обеспечения, они тестируются на программно-аппаратных комплексах, которые устанавливаются на специализированных тренажёрах и симуляторах. И важно отметить, что сегодня операторы беспилотных воздушных средств востребованная профессия, которая требует разносторонней подготовки специалистов.

На сегодняшний день можно различать несколько компьютерных систем, которые нацелены на работы в области управления и мониторинга беспилотных воздушных средств.

Во-первых, это учебные системы, такие как Arduino, к которым прибегают в большинстве учебных центров, нацеленных на подготовку операторов.

Во-вторых, при условии использования нейронных сетей, компьютерные системы направлены на разработку соответствующих программ, позволяющих: повысить качество передачи изображений, увеличить диапазон передачи данных, минимизировать вероятность перехвата управления и прч. Это достигается за счет модификации существующих методов глубокого обучения и шаблонных алгоритмов (RL, SARSA, DQN, DDPG и пр.).

В-третьих, такие компьютерные системы, как Python 3.6 (Jupyter-notebook), программные среды, как MatLab (всех модификаций), а также новые операционные системы служат не только успешной автоматизации и росту качества предоставляемой БЛА информации, но и позволяют перейти на новый уровень - самообучающихся программ, которые в конечном итоге должны не только автоматически обновляться, но и выстраивать новые связи в рамках интеллектуальной системы автоматического управления БВС.

Кроме того, все вышеперечисленные системы в той или иной степени, но позволяют задавать различные параметры поиска, мониторинга состояния и идентификации удаленного оборудования. Это является ключевой задачей службы радиомониторинга, которая выполняет ряд ключевых задач радиотехнической поддержки работы с беспилотных воздушных средств. Мониторинг позволяет решить вопрос как безопасности, так и благонадёжности оборудования. Но в целом система мониторинга при помощи радиофизических систем позволяет выполнять процедуры обработки полученных данных, их оперативное распределение и таким образом происходит повышение уровня обеспечения безопасности информационного обмена.

Мониторинг с помощью радиофизических систем имеет свои положительные стороны, так как определяется оперативностью и возможностью быстрой дешифровки. Но в то же время необходимо учитывать и ряд особенностей:

- широкий перечень частот, по которым передаётся информация может быть перехвачен неблагонадёжными элементами (15 полос, три из которых разрешены для гражданских нужд);

- сами модели БВС разнообразны и могут отличаться техническими характеристиками, что усложняет процесс общего контроля;

- применение радиопеленгаторов имеет как стратегический потенциал, при широкой области покрытия, так и ряд трудностей по определению места расположения приборов радиофизического контроля, скорости передачи и получения данных, а так же их точной фиксации;

- кардинаметрия так же имеет свои положительные и отрицательные стороны, как в гражданском, так и в военном плане, так как зависит от мощности рассматриваемого аппарата и выбранной частоты передачи. Последние могут глушиться и/или перехватываться сторонними наблюдателями, что, в свою очередь приведёт к нарушению всей цепочки информационного обмена.

Следовательно, можно говорить о том, что большая вероятность успешного применения радиофизических систем для мониторинга и идентификации беспилотных воздушных средств зависит от выбора самого аппарата, его характеристик и свойств.

Но в то же время, если осуществление мониторинга – явление повсеместное, то с идентификацией существует ряд проблемных зон, которые не решены и сегодня.

Вычленив разницу между военными и гражданскими беспилотными воздушными средствами возможно по мощности, дальности управления и перечню каналов передачи и обработки сигнала. Но, вопросы идентификации беспилотников и сегодня остро стоят на повестке дня, так как в большей степени возникают трудности именно из-за широкого перечня моделей, которые могут быть использованы, как в гражданских, так и в военных целях.

Безусловно, существует регламент регистрации беспилотных воздушных средств, но, как показывает практика для реализации преступных целей юридическая сторона вопроса опускается и часто власти получают информацию том, что сбитые аппараты не имели идентификационного номера, или, что является наиболее опасным вариантом развития информационной войны - вражеские БВС могут дублировать номера отечественных. Подобные случаи указывают на проблему утечки информации и говорят о необходимости кодирования системы идентификации дронов разведчиков и подобной техники.

Выбор системы радиофизического мониторинга также определяет возможности оперативного получения данных, фиксации и идентификации находящихся в ведении аппаратов. Например, ОМЕГА-М5 позволяет работать на дальних расстояниях, передавая данные на высоких скоростях и обнаруживать вредоносные сигналы в диапазоне от 9 кГц до 12 ГГц, но имеет громоздкое оборудование не позволяет мобильно передвигаться оператору, также можно отметить ST-154, OSCOR Blue, Green и прочие модификации.

Кроме перечисленных систем существует ряд моделей, которые хорошо идентифицируют локализуют и ловят сигнал различных моделей сотовых телефонов и других передатчиков, которые не имеют отношения к воздушной технике, но могут быть применены в целях обнаружения таковой. Но, в целом, сложно говорить о том, что на сегодняшний день существует универсальная система, которая бы соответствовала всем требованиям безопасности и интересам пользователей.

Следовательно, применение систем радиофизического мониторинга БВС необходимо, как в гражданском, так и военном направлениях, но, существует ряд трудностей, которые решаются современными программистами и разработчиками. Но вопрос о выборе соответствующего оборудования остается открытым и решаться будет непосредственно руководителями тех или иных разведывательных работ.

А. В. Осовский¹, Д. В. Кутузов¹, О. В. Стукач²

¹Астраханский государственный технический университет
Астрахань, Российская Федерация

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Москва, Российская Федерация

СЕТИ НА КРИСТАЛЛЕ С ВЫЯВЛЕНИЕМ ПЕРЕГРУЗОК

Аннотация. На основе идеологии нечёткой логики предложены алгоритмы и набор правил для выявления перегрузок маршрутизаторов сети на кристалле (Network-on-Chip, NoC). Разработанные алгоритмы позволяют рассчитывать вероятность перегрузки маршрутизаторов и для различных сценариев нагрузки строить тепловые карты состояния сети. Многочисленные примеры показали эффективность предложенных алгоритмов своевременного выявления перегрузок, что даёт широкую возможность адаптации протоколов маршрутизации в сетях NoC и управления трафиком.

Ключевые слова: интенсивность поступления трафика, сеть на кристалле, управление трафиком, прогнозирование перегрузок, маршрутизация.

Для цитирования: Осовский А. В., Кутузов Д. В., Стукач О. В. Сети на кристалле с выявлением перегрузок // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 141–143.

A. V. Osovsky¹, D. V. Kutuzov¹, O. V. Stukach²

¹Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

²National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation

NETWORKS-ON-CHIP WITH CONGESTION DETECTION

Abstract. Based on the ideology of fuzzy logic, the paper proposes algorithms and a set of rules for detecting network-on-chip (NoC) congestions. The developed algorithms offer the means to calculate the probability of congestion in routers and to build heat maps of the network status for various load scenarios. Numerous examples have shown the effectiveness of the proposed congestion detection algorithms, which makes it possible to adapt routing protocols in NoC and traffic control.

Keywords: traffic intensity, network-on-chip, traffic control, congestion forecasting, routing.

For citation: Osovsky A. V., Kutuzov D. V., Stukach O. V. Networks-on-chip with congestion detection // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 141–143.

С усложнением и увеличением числа вычислительных задач возрастает потребность в высокопроизводительных системах, что стимулирует разработку более сложных многопроцессорных архитектур, в частности, многоядерных. В таких структурах весьма важно наличие специализированных средств для межпроцессорной связи и управления потоками данных. Считается, что количество ядер в многопроцессорных системах будет увеличиваться и достигнет примерно 5000 к наступающему году. В современных «сетях на кристалле» (Network-on-Chip, NoC), которые активно применяются в многоядерных системах, каждое ядро подключается к коммуникационной сети, которая маршрутизирует пакеты между ними. Каждое ядро со своим маршрутизатором взаимодействует через сеть маршрутизаторов со всеми остальными ядрами. Концепция

NoC позволяет разработчикам разделить коммуникационную структуру от обработки и хранения, оптимизируя инфраструктуру межсетевых соединений.

При передаче информационных пакетов от источника к получателю они проходят через множество маршрутизаторов. И увеличение количества ядер в NoC приводит к увеличению среднего расстояния между узлами. Поэтому пакеты занимают сетевые ресурсы, оставаясь внутри сети NoC длительное время. Перегрузка возникает, когда несколько пакетов одновременно конкурируют за общие ресурсы. Следовательно, сетевые протоколы должны иметь методы контроля перегрузки в NoC и управления внутренним трафиком.

Для определения перегрузки подсчитывается количество запросов, которые отправляются на коммутатор с разных входов для отправки пакета на конкретный выход. Этот критерий анализирует активность маршрутизатора за некоторый интервал времени. Состоянием перегрузки считается превышение определённого порога. Его значение очень важно, поскольку оно может повлиять на эффективность учёта перегрузок. Предлагается использование не одного, а двух пороговых значений. Это даёт возможность более гибко управлять маршрутизаторами, поскольку используется нечёткая логика:

- если среднее значение занятых буферов меньше первого порога, то перегрузка не фиксируется;
- если среднее значение находится между первым и вторым пороговыми значениями, то перегрузка фиксируется с определённой вероятностью, которая линейно зависит от среднего значения числа заполненных буферов, и система пытается предотвратить перегрузку;
- если среднее значение превышает второй порог, фиксируется перегрузка, и система пытается ее обработать.

С использованием методов нечеткой логики можно развить адаптивные алгоритмы маршрутизации в сетях NoC. Для моделирования с помощью специализированного симулятора NoC Noxim были получены данные работы сети: две выборки данных, содержащих максимальные и средние загрузки буферов. При этом использовались следующие параметры: mesh-сеть вычислительных ядер размером 4×4; размер буфера 16 флитов; алгоритм XY-маршрутизации; пуассоновская функция распределения трафика во времени со скоростью поступления от 0,01 до 0,5 с интервалом 0,01 для каждого испытания; случайное распределение трафика между ядрами. Для построения системы детектирования перегрузок использовалась библиотека skfuzzy языка программирования Python.

Для реализации нечёткой логики методом Такаги–Сугено используются следующие входные переменные:

- промежуточной центральности (Betweenness Centrality, BC) со значениями 2,08; 10,75; 26,42;
- средняя загрузка буферов маршрутизатора 0; 16;
- скорость поступления пакетов (pir) из диапазона [0,01; 0,1]. PIR выше 0,1 считается высоким, приводящим к быстрой перегрузке системы.

Для трёх входных переменных количество правил равно 27. Выходная переменная представляет собой вероятность возникновения перегрузки и лежит в диапазоне [0; 1], который поделён на три интервала: «низкая», «средняя», «высокая».

На рис. 1 представлена типичная зависимость вероятностей возникновения перегрузки от PIR и уровня загрузки буферов при фиксированном BC.

Тепловые карты (рис. 2) могут быть построены для визуального анализа пространственного распределения загрузки маршрутизаторов NoC. Из рис. 2 видно, что при низких значениях PIR имеется очень немного случайных маршрутизаторов с высокой веро-

ятностью перегрузки. При повышении PIR растёт вероятность перегрузки маршрутизаторов, находящихся в центре сетки. При самых высоких значениях PIR вероятность перегрузки всех маршрутизаторов сети чрезвычайно велика.

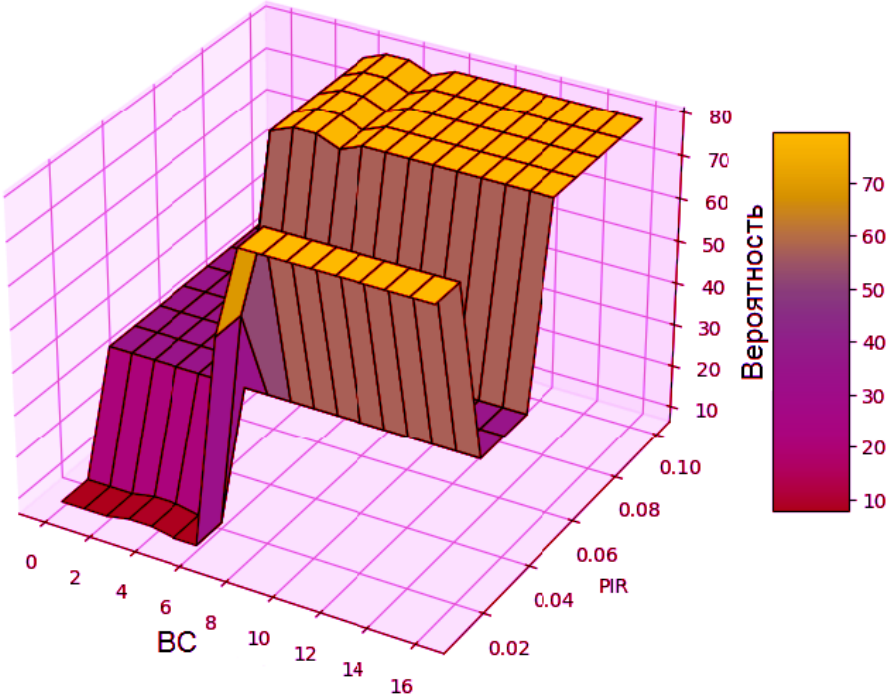


Рис. 1. Зависимость вероятностей возникновения перегрузки от PIR и уровня загрузки буферов при фиксированном BC

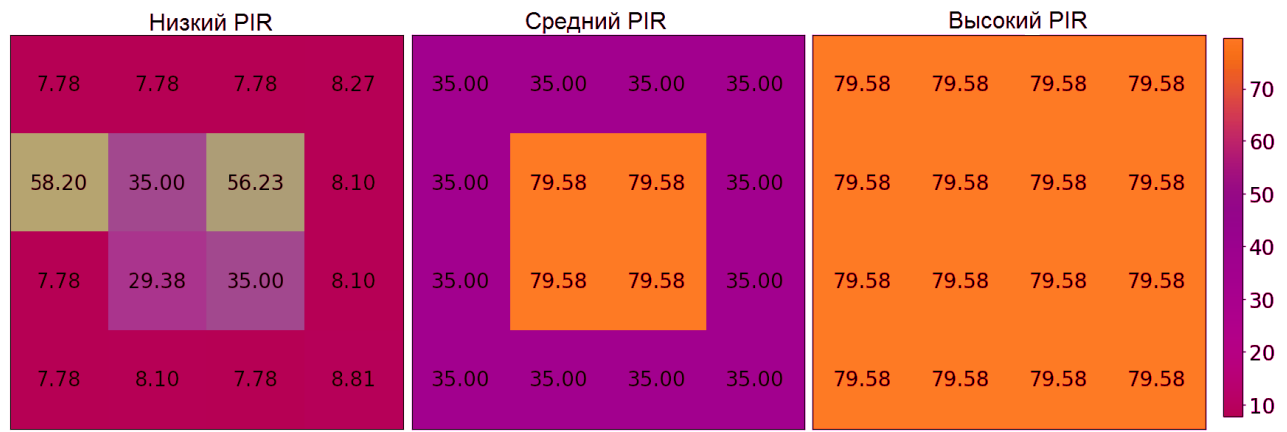


Рис. 2. Пример тепловой карты

Результаты демонстрируют возможность раннего выявления состояний перегрузки маршрутизаторов сети NoC на основании анализа PIR, уровня загрузки буферов и метрики BC. Построенные тепловые карты показывают высокую корреляцию между положением маршрутизатора в сети и его склонностью к перегрузкам.

С. А. Подлиннов¹, Д. С. Фадеева¹, А. В. Фатеев^{1,2}

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Томск, Российская Федерация

²ООО НПК «ТЕСАРТ», Томск, Российская Федерация

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МЕТОДОМ ОТКРЫТОГО КОНЦА КООКСИАЛЬНОЙ ЛИНИИ

Аннотация. Работа посвящена повышению точности измерений комплексной относительной диэлектрической проницаемости материалов методом открытого конца коаксиальной линии. Представлена реализация модифицированной процедуры калибровки математического аппарата с целью исключения систематической погрешности, вызванной потерями на излучении на торце линии. Приведены результаты сравнительных измерений, подтверждающие, что этот математический алгоритм обеспечивает более высокую точность по сравнению с другими представленными в работе алгоритмами.

Ключевые слова: высокочастотные измерения, открытый конец коаксиальной линии, коэффициент отражения, диэлектрическая проницаемость, калибровка математической модели.

Для цитирования: Подлиннов С. А., Фадеева Д. С., Фатеев А. В. Модернизированный алгоритм оценки диэлектрической проницаемости методом открытого конца коаксиальной линии // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 144–147.

S. A. Podlinnov¹, D. S. Fadeeva¹, A. V. Fateev^{1,2}

¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

²LLC RPC “TESART”, Tomsk, Russian Federation

MODERNIZED ALGORITHM OF PERMITTIVITY MEASUREMENT BY THE OPEN-ENDED COAXIAL PROBE METHOD

Abstract. The paper is devoted to increasing the accuracy of measurements of the complex relative permittivity of materials using the open-ended coaxial probe. The article presents the implementation of the modified procedure for calibrating the mathematical apparatus in order to eliminate the systematic error caused by radiation losses at the end of the line. The results of comparative measurements are presented, confirming that this mathematical algorithm provides higher accuracy compared to other algorithms presented in the work.

Keywords: high-frequency measurements, open-ended coaxial probe, reflection coefficient, permittivity, calibration of a mathematical model.

For citation: Podlinnov S. A., Fadeeva D. S., Fateev A. V. Modernized algorithm of permittivity measurement by the open-ended coaxial probe method // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 144–147.

Одним из широко используемых методов для оценки диэлектрической проницаемости материалов в СВЧ-диапазоне является метод открытого конца коаксиальной линии. В основе применяемого метода лежит определение комплексной относительной диэлектрической проницаемости материалов путем измерения модуля и фазы коэффициента отражения от его поверхности. Процесс измерений комплексного коэффициента

отражения выполняется посредством подключения коаксиальной линии с открытым концом к одному из портов векторного анализатора цепей и приведения открытого конца линии в контакт с образцом исследуемого материала. В случае с жидкими образцами линию необходимо погрузить на глубину не менее 5 мм, с твердыми образцами – плотно прислонить к его ровной поверхности. После чего зарегистрированный комплексный коэффициент отражения подвергается математической обработке с целью расчета диэлектрической проницаемости образца. Структурная и эквивалентная схемы системы измерений рассматриваемого метода изображены на рис. 1. Эквивалентная схема состоит из двух параллельно подключенных емкостей – постоянной емкости, связанной с параметрами линии, и переменной краевой емкости, которая зависит от диэлектрических свойств прикладываемого диэлектрика. Также к ним параллельно подключен резистор, который определяет излучение, возникающее на открытом конце коаксиальной линии.

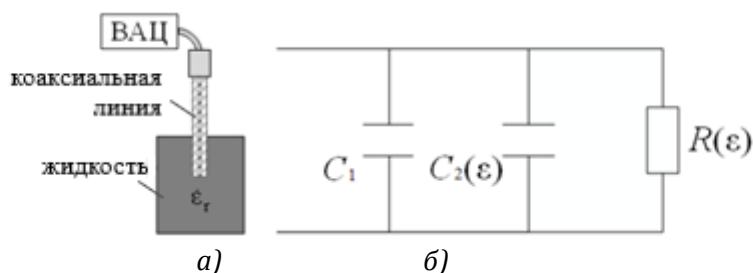


Рис. 1. Система измерений метода открытого конца коаксиальной линии:
а) структурная схема, б) эквивалентная схема

Существует несколько математических алгоритмов для получения комплексной относительной диэлектрической проницаемости образцов, исследуемых с помощью метода открытого конца коаксиальной линии. Один из этих алгоритмов предполагает этап калибровки математического аппарата, в ходе которой проводятся измерения комплексного коэффициента отражения для трех эталонных нагрузок – холостого хода, короткого замыкания и нагрузки с известными диэлектрическими свойствами. Полученные значения комплексных коэффициентов отражений затем используются при расчете калибровочных коэффициентов. Завершающий этап алгоритма включает в себя определение диэлектрической проницаемости образца исследуемого материала с помощью измеренного коэффициента отражения от его поверхности и ранее рассчитанных калибровочных коэффициентов.

Известен также альтернативный подход к оценке диэлектрической проницаемости материалов. Он содержит в себе калибровку математической модели, которая подразумевает под собой измерение комплексного коэффициента отражения для таких двух эталонных нагрузок, как холостого хода и нагрузки с известными диэлектрическими свойствами. Полученные данные используются для расчетов двух емкостей, изображенных на рис. 1. Из этих емкостей и измеренного коэффициента отражения исследуемого материала затем можно получить его комплексную относительную диэлектрическую проницаемость.

В приведенных выше алгоритмах не учитываются потери на излучение, так как считается, что их воздействие на результат измерений незначителен. Тем не менее, существует способ их полного исключения путем введения трехэтапной калибровки с использованием следующих эталонных нагрузок – холостого хода и двух нагрузок с известными диэлектрическими свойствами. Для каждого из трех калибровочных состояний описывается полная проводимость эквивалентной схемы, представленной на рис. 1, и составляется система уравнений для поиска неизвестных значений трех элементов

схемы. Полученные в результате этого емкости и измеренный комплексный коэффициент отражения исследуемого образца применяются для расчета его комплексной относительной диэлектрической проницаемости по такому же принципу, как на завершающем этапе второго математического алгоритма, описанного ранее.

С целью верификации модифицированного алгоритма для определения комплексной относительной диэлектрической проницаемости и сравнения с другими алгоритмами, не учитывающими потери на излучение, было проведено электромагнитное моделирование в САПР. В процессе моделирования была создана модель коаксиальной линии, линейный участок которой составлял 20 мм и волновое сопротивление – 50 Ом. Эта линия приводилась в контакт с твердыми и жидкими образцами, причем в жидкие было осуществлено погружение на глубину 19 мм. Для калибровок математических моделей в качестве холостого хода был использован воздух, а в качестве нагрузок с известными свойствами – деионизированная вода и этиловый спирт. Исследуемый материал представлял собой твердый образец с заданными диэлектрическими свойствами.

Ниже на рис. 2 приведено сравнение комплексной относительной диэлектрической проницаемости образца, полученной путем электромагнитного моделирования в САПР и последующей математической обработки тремя ранее перечисленными способами, с заданной вручную в САПР.

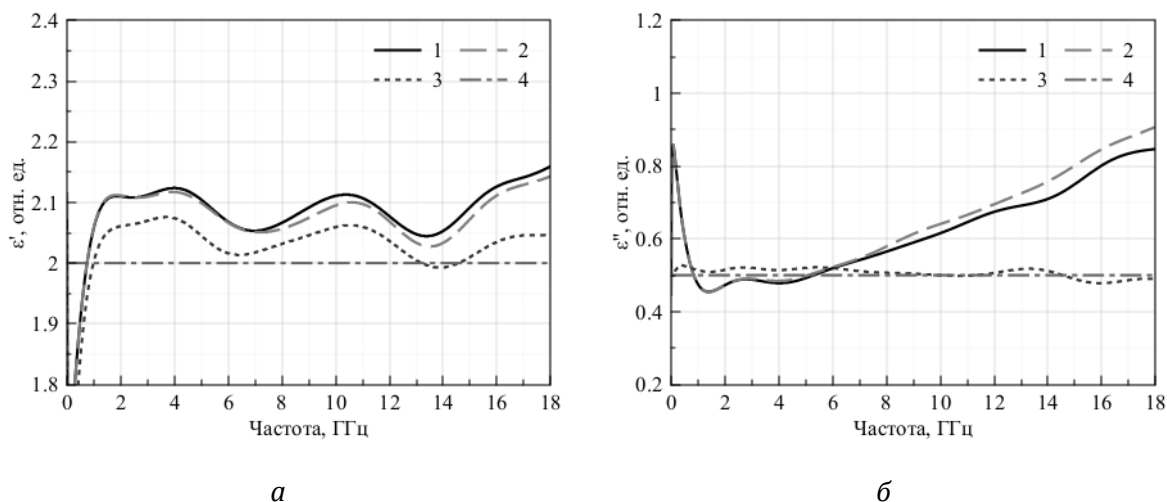


Рис. 2. Сравнение комплексной относительной диэлектрической проницаемости образца, полученной путем использования представленных в работе математических алгоритмов, с заданной в САПР: (а) – действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости; (б) – мнимая часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости:

- 1 – алгоритм с калибровкой на воздух, короткое замыкание и деионизированную воду;
- 2 – алгоритм с калибровкой на воздух и деионизированную воду;
- 3 – алгоритм с калибровкой на воздух, деионизированную воду и этиловый спирт;
- 4 – значения диэлектрической проницаемости материала, заданные в САПР

Из представленного графика зависимости мнимой части комплексной относительной диэлектрической проницаемости образца от частоты можно сделать вывод, что математические алгоритмы без учета возникающего излучения дают относительно близкие друг к другу значения, которые стремительно возрастают с ростом частоты. В случае модифицированного алгоритма, который учитывает влияние рассеиваемой энергии на результат измерений, на графике наблюдаются значения, обладающие незначительным отклонением от заданных в САПР на этапе электромагнитного моделирования.

Если рассматривать действительную часть диэлектрической проницаемости, то

значения, полученные с помощью трех математических алгоритмов, не обладают существенными отличиями друг от друга и близки к заданным в САПР. Причем значения, полученные с помощью исключения возникающего на конце линии излучения, ближе к заданным вручную, чем в случаях с другими математическими алгоритмами.

На основе сравнительного анализа можно сделать вывод о работоспособности ранее предложенной модернизации математического алгоритма для получения комплексной относительной диэлектрической проницаемости образцов с использованием метода открытого конца коаксиальной линии. Также можно сделать вывод о том, что модернизированный алгоритм позволяет получить более точные результаты в сравнении с другими представленными в работе алгоритмами.

Для того, чтобы применить представленный математический аппарат в реальных измерениях, на этапе математической калибровки важно использовать нагрузки с заранее известными диэлектрическими свойствами, описанными в математическом аппарате.

А. А. Сулима

АО «НПП «Полет», Нижний Новгород, Российская Федерация

ПОКОЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ РАДИОСРЕДСТВ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Аннотация. Описаны поколения систем радиосвязи, особенности технических решений, отличающих их друг от друга, сформулированы требования к радиосредствам шестого поколения.

Ключевые слова: радиосвязь, радиофотоника, помехозащищенность, поколения радиосистем.

Для цитирования: Сулима А. А. Поколения авиационных радиосредств и их особенности // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 148–150.

A. A. Sulima

JNC NPP Polet, Nizhny Novgorod, Russian Federation

GENERATIONS OF AVIATION RADIO DEVICES AND THEIR FEATURES

Abstract. The generations of radio communication systems are described, the features of technical solutions that distinguish them from each other, and the requirements for sixth-generation radio equipment are formulated.

Keywords: radio communication, radiophotonics, noise immunity, generations of radio systems.

For citation: Sulima A. A. Generation of aviation radio devices their features // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 148–150.

В последнее время появляется большое количество разных систем связи, от различных производителей, которые традиционно их относят к какому-либо поколению, к четвертому, пятому, или шестому, иногда говорят даже о технологиях связи седьмого поколения. Однако, до настоящего времени не существует какой-либо общепринятой классификации и критериев отнесения к тому или иному поколению систем связи, что дает простор для определённых спекуляций. В целом, для оценки перехода от одного поколения к другому можно использовать обобщенное правило, заключающееся в том, что при переходе на новое поколение происходит качественный скачок, обусловленный новыми технологическими решениям обеспечивающих значительное (кратное) улучшение одного или нескольких основных параметров системы или появлении принципиально новых свойств, без ухудшения остальных, в ином случае можно говорить о модернизации или промежуточном поколении (например, 4+). Так частичная модернизация существующей системы – это изменение ее параметров, отдельных элементов (или структуры) вызывающее небольшое улучшение одного или нескольких показателей качества. Значительная модернизация (создание промежуточного поколения) – это изменение параметров, элементов или структуры системы вызывающее значительное улучшение одного или нескольких показателей качества. А создание новой системы (нового поколения) – это внедрение новых принципов работы для принципиального (в разы) улучшения одного, нескольких или при совокупной оценке основных показателей качества при решении тех же или новых задач. Возможен вариант, когда последовательное количество изменений, вносимых в конструкцию и технологию радиосредства, достигают определенного объема, позволяющего оценить новое радиосредство как качественный

технологический скачок. При этом нельзя путать способ достижения определенного качества и само качество, так, например, переход на использование процессоров общего назначения в радиосредствах само по себе не является качественным скачком, в отличие, например, от перехода на технологии программно-определяемого радио, которую позволило обеспечить данное техническое решение. Таким образом, в докладе не рассматриваются изменения, полученные путем применения более современной элементной базы или внедрения новых сигнально-кодовых конструкций, а только изменения, характеризующиеся изменением функциональных возможностей. Также необходимо понимать, что термин «поколение» – это достаточно условный термин, и поколения радиосредств авиационной связи не обязательно коррелируют с поколениями самолетов, на которые они устанавливаются, или с определением поколений радиосредств сухопутных или морских сил и объектов.

В области авиационной радиосвязи базовым или первым поколением радиосредств можно считать радиостанции, появившиеся в начале двадцатого века. Характеризовалось данное поколение работой на аппаратно фиксированных частотах и режимах работы, без возможности какой-либо оперативной перестройки. Период активного использования радиосредств первого поколения можно отнести к десятилетиям тридцатым годам прошлого века.

Второе поколение радиосредств характеризовалось появлением в радиосредствах оперативной возможности изменения режимов и частот работ, однако диапазонные радиостанции представляли собой автономные изделия, работающие независимо друг от друга без какой-либо автоматизации управления. Их появление приходится на 30-50-е годы прошлого века.

Третье поколение характеризовалось объединением аппаратуры по функциональному признаку в комплексы связи, при этом изделия представляли собой отдельные радиосредства слабой степени автоматизации. Активное появление таких радиосистем относится к периоду 60х-70х годов.

Четвертое поколение радиосистем характеризовалось высокой степенью автоматизации (для чего обычно в состав комплекса, состоящего из различных радиосредств, вводился специализированный вычислитель, выполнявший функции автоматизированного управления, обработки команд и управления составными частями комплекса), широким набором радиосредств различного диапазона и режимов работ. Период активного создания подобных радиосистем – это 80е-90е года и начало 21 века.

Пятое поколение радиосредств авиационной связи характеризуется высокой степенью интеграции радиосредств, как между собой, так и с иными системами объекта размещения. Базовым требованиям к системам пятого поколения является высокая автоматизация выполняемых функций и реализация технологии программно-определяемого радио, позволяющая вводить новые сигнально-кодовые конструкции для работы радиосредства без изменения аппаратной части. Работы по созданию подобных радиосредств пришлось на период 00х-20х годов 21 века.

К типовым бортовым комплексам связи пятого поколения, серийно производящимся в настоящее время, можно отнести комплекс связи С-111, установленный на самолете Су-57. Комплекс спроектирован на базе интегрированной программно-аппаратной архитектуры (с использованием технологии программно-определяемого радио), что в отличие от федеративной архитектуры, использовавшейся на радиосистемах предыдущего поколения, позволяет выполнять функциональную интеграцию оборудования на всех уровнях и соответственно позволяет значительно снизить массу и габариты аппаратуры связи. Улучшение основных характеристик в части помехоустойчивости, скорости передачи информации, массы и габаритов составляет от 30 до 100% по сравнению с комплексами четвертого поколения.

В настоящее время в России ведутся работы по созданию авиационных радиосистем шестого поколения, базовые требования к которым можно сформулировать как высокая адаптивность (когнитивное радио) и высокая помехозащищенность. Основными технологиями, позволяющими реализовать данные требования можно назвать использование радиофотоники для межблочных связей и переход к радиосредствам, реализующим адаптивное (либо на основе сканирования и анализа состояния радиозоферы, либо на основе оценки соотношения таких параметров как сигнал/шум или оценка битовой ошибки) построение радиоканалов, подобные системы иногда относят к когнитивным радиосистемам. Нужно понимать, что терминология «когнитивные радиосистемы» которая используется в настоящее время в отношении отдельных радиосредств, это скорее маркетинговый ход, так как существующие т.н. когнитивные системы используют адаптивные модели оценки канала, а не построены на базе предиктивных моделей, что в целом не соответствует термину «когнитивность», подразумевающего анализ, накопление и прогнозирование состояния окружающей среды и соответственно реакции на планируемые изменения в будущем, а не изменение настроек постфактум. Радиофотоника, или использование оптоволокну для межблочного соединения внутри радиосвязного комплекса, позволяет значительно снизить массу кабельного хозяйства, исключить проблемы, связанные с влиянием электромагнитных полей, а также снизить потери мощности в трактах прохождения сигнала, что влечет за собой улучшение массогабаритных характеристик и энергопотребления.

При этом нужно отметить, что при переходе на новое поколение, благодаря совокупности технических решений может наблюдаться улучшение и иных параметров, таких как повышение помехозащищенности, дальности, расширение рабочего диапазона и повышение скорости передачи, однако это не является признаком нового поколения по отдельности, а обычно является следствием развития элементной базы.

В дальнейшем развитие систем радиосвязи и переход к следующим поколениям можно прогнозировать как дальнейшее аппаратное и функциональное объединение и слияние составных частей с целью минимизации массы и габаритов радиосвязной аппаратуры, повышение автоматизации, вплоть до реализации автономных интеллектуальных систем на базе предиктивных моделей различного типа, а также появление новых функциональных возможностей. Соответственно актуальными вопросами в настоящее время становятся вопросы создания концепции развития систем связи в рамках изменения технологических парадигм в радиосвязи и освоение промышленными и научными организациями новых технологий необходимых для ее реализации, что, в свою очередь, учитывая высокие финансовые и трудозатраты, требует участия государства в виде финансирования и курирования данных работ.

Н. С. Ташев^{1,2}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

²Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ УСЛОВИЙ МЕСТ РАЗВЕРТЫВАНИЯ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОСТАНЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ МАЛЫХ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Условия на удаленных объектах схожи друг с другом. Рассматриваются особенности, которые необходимо учитывать при развертывании радиостанций на территории малых удаленных объектов для минимизации негативного влияния на качество и надежность проведения радиосвязи. Выделение небольших площадей для развертывания радиостанции и антенно-фидерных устройств, частые перебои по электропитанию, высокий уровень промышленных помех могут оказать влияние на проведение радиообмена, в том числе и в режимах работы современных радиолиний.

Ключевые слова: КВ-диапазон, промышленные помехи, отношение сигнал/шум, размещение антенн.

Для цитирования: Ташев Н. С. Особенности условий мест развертывания коротковолновых радиостанций на территории малых удаленных объектов // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 151–152.

N. S. Tashev^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

FEATURES OF CONDITIONS OF HF RADIO STATION DEPLOYMENT SITES IN SMALL REMOTE AREAS

Abstract. Conditions at remote sites are similar to each other. This article discusses the features that must be taken into account when deploying radio stations on the territory of small remote sites to minimize the negative impact on the quality and reliability of radio communications. The allocation of small areas for the deployment of a radio station and antenna-feeder devices, frequent power outages, and a high level of industrial interference can affect radio communications, including in the operating modes of modern radio links.

Keywords: HF range, industrial interference, signal/noise ratio, antenna placement.

For citation: Tashev N. S. Features of conditions of HF radio station deployment sites in small remote areas // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 151–152.

Главным показателем качества радиосвязи является отношение сигнал/шум (ОСШ), а показателем надежности – безотказная работа радиостанции с допустимым для радиообмена ОСШ на весь период проводимого сеанса радиосвязи, при отсутствии негативных факторов влияния на распространения радиоволн.

К основным средствам связи радиостанций относятся: радио приемные устройства

(РПУ), радиопередающие устройства (РПДУ) и АФУ. Зачастую современные построенные по технологии SDR РПУ и РПДУ малогабаритны, насколько это возможно, и обеспечивают необходимые, для надежного проведения радиосвязи, требования. РПУ различаются количеством каналов приема, полосой пропускания, режимами работ, а РПДУ классами и мощностью излучения. РПУ и РПДУ выбираются исходя из требований Заказчика и дальности проведения радиосвязи.

Выбор АФУ определяется дальностью радиосвязи и площадью, выделяемой под развертывание антенн. В системах коротковолновой радиосвязи применяются полно-размерные антенны, установочные размеры которых могут достигать сотен метров. При необходимости обслуживания большого числа абонентов на трассах свыше 3000 км целесообразно использование фазированных антенных решеток (ФАР) с круговой диаграммой направленности, обеспечивающих расширенное покрытие, однако и для их установки также требуются свободные поля. В условиях ограниченной площади для развертывания АФУ приходится прибегать к использованию малогабаритных антенн, таких как штыревые, спиральные, магнитные рамочные, наклонные Т-образные (Т2×13) и симметричные вибраторные антенны (Д2×13), с учетом расчёта среднегодовых оптимальных рабочих частот (ОРЧ) на требуемые дальности радиосвязи.

Проблемы с частыми перебоями электропитания не всегда связаны с потребителями. Возможными причинами могут быть различные аварии на подстанции, перегрузка из-за наращивания мощности потребления участка/района, чрезвычайной ситуацией из-за погодных условий. В соответствии с выше указанными факторами для обеспечения бесперебойной и надежной радиосвязи необходимо использовать источники бесперебойного электропитания (ИБЭП) для предупреждения кратковременного отсутствия питания радиостанции и дизельные электро-агрегаты для предупреждения длительного отсутствия питания.

Особенностью высокого уровня промышленных на территории МУО в основном является близкое расположение приемных антенно-фидерных устройств непосредственно к источникам электромагнитных помех. Источниками помех являются преобразователи тока, которые используются в светодиодных лампах освещения, в вычислительной технике, в пожарной, охранной и других инженерных системах. При этом помехи распространяются по всем проводам электропитания, подключенным к описанным приборам выше. Также, являются источником помех и высоковольтные ЛЭП. Для обеспечения снижения влияния промышленных помех при сохранении способности принимать полезный сигнал необходимо избегать развертывания приемных АФУ на крышах и в непосредственной близости зданий. Необходимый минимум развертывания приемных АФУ находится в 50-100 метрах от здания, высоковольтных линий, и других, возможных, источников промышленных помех.

При развертывании радиостанций на территории МУО следует провести обследование заземления объекта. Заземление также может выступать источником помех от штатного оборудования объекта. При необходимости радиостанцию следует заземлить от дополнительного контура заземления.

В заключение следует отметить, что развертывание радиостанций на ограниченных территориях создает серьезную проблему: недостаток площади под антенные поля вынуждает размещать антенны в непосредственной близости от зданий – источников промышленных помех. Такое расположение антенн неизбежно ухудшает прием полезного сигнала. Для минимизации данного негативного воздействия крайне важно применять на практике предложенные в статье рекомендации по борьбе с промышленными помехами.

Н. Н. Шумилов

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА СЕТЕВОГО ТРАФИКА

Аннотация. Представлен программно-аппаратный комплекс для мониторинга сетевого трафика. Он сочетает в себе возможности аппаратного захвата трафика и программного анализа с использованием свободно распространяемого программного обеспечения. Комплекс позволяет собирать и анализировать данные о сетевых соединениях, выявлять активные источники трафика, классифицировать используемые протоколы, визуализировать статистику и сохранять информацию для последующего анализа. Основой решения служит встраиваемая платформа с двумя Ethernet-интерфейсами, работающая под управлением Linux. Комплекс функционирует в режиме сетевого моста, что обеспечивает прозрачный контроль без нарушения работы сети.

Ключевые слова: мониторинг сетевого трафика, анализ трафика, сетевой мост.

Для цитирования: Шумилов Н. Н. Программно-аппаратный комплекс мониторинга сетевого трафика // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 153–155.

N. N. Shumilov

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR NETWORK TRAFFIC MONITORING

Abstract. The paper presents a software and hardware solution for network traffic monitoring. The system combines hardware-based packet capture with software analysis using open-source tools. The system enables the collection and analysis of data on network connections, identification of active traffic sources, classification of protocols used, visualization of statistics, and storage of information for subsequent analysis. The solution is based on an embedded platform with two Ethernet interfaces running Linux. The complex operates in network bridge mode, ensuring transparent monitoring without disrupting network operations.

Keywords: network traffic monitoring, traffic analysis, network bridge.

For citation: Shumilov N. N. Software and hardware complex for network traffic monitoring // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 153–155.

Оперативный и точный мониторинг сетевого трафика является ключевым фактором обеспечения безопасности и эффективности работы корпоративных и промышленных сетей. Анализ проходящих через сеть данных позволяет выявлять аномалии, контролировать потребление ресурсов, а также предотвращать несанкционированные действия. В современных условиях, когда критически важные системы требуют высокой производительности и надежности, использование специализированных программно-аппаратных комплексов становится особенно актуальным.

Целью данной работы являлось создание автономного программно-аппаратного решения, способного осуществлять непрерывный мониторинг сетевого трафика в реальном времени. Разработка ориентирована на использование в ситуациях, где требуется контроль передачи данных без вмешательства в существующую сетевую инфраструктуру и без влияния на производительность каналов связи.

Разрабатываемый комплекс предназначен для установки в разрыв канала между двумя сегментами сети. Устройство осуществляет захват всего проходящего через него трафика, не вмешиваясь в содержимое пакетов и не влияя на их маршрутизацию. Такой подход обеспечивает полную прозрачность для участников сети и высокую надежность мониторинга.

В составе комплекса выполнены следующие основные задачи: перехват и регистрация всех проходящих сетевых пакетов; определение IP-адресов источников и получателей; извлечение информации о портах и протоколах; классификация сетевых потоков и ведение статистики; сбор данных о скорости передачи и объемах трафика; визуализация результатов в виде таблиц и графиков; фильтрация информации по заданным критериям – IP-адресам, MAC-адресам, портам и временным интервалам.

Аппаратная часть построена на базе отечественной встраиваемой платформы с двумя сетевыми контроллерами Ethernet, что является ключевым требованием для организации логического моста (bridge) между двумя сетевыми сегментами. Устройство работает под управлением операционной системы Linux. Использование Linux обеспечивает гибкость и широкие возможности для разработки программного обеспечения, в том числе для низкоуровневого доступа к сетевым интерфейсам. Для объединения двух физических сетевых интерфейсов в единый логический мост используется стандартная функциональность Linux, которая позволяет перехватывать весь трафик, проходящий через устройство, и направлять его для дальнейшего анализа.

Программная часть комплекса реализована на языке C++ и представляет собой многопоточное приложение, обеспечивающего в реальном времени захват пакетов и измерение пропускной способности. В качестве основного инструмента захвата используется библиотека `libpcap`, предоставляющая низкоуровневый доступ к сетевым интерфейсам и позволяющая перехватывать все пакеты, проходящие через мост. ПО состоит из нескольких взаимосвязанных компонентов: модулей захвата трафика и измерения скорости, обработки пакетов, фильтрации и группировки данных, а также механизма конфигурирования.

Программно-аппаратный комплекс функционирует как пассивный анализатор трафика. Аппаратная платформа, подключенная в разрыв сетевого канала, создает прозрачный сетевой мост. Весь трафик, проходящий через мост, становится доступным для программного обеспечения.

Основная логика работы предполагает параллельную работу на двух независимых потоках. Первый поток непрерывно захватывает пакеты с интерфейса моста, определяет их тип (IP, ARP, ICMP, TCP, UDP) и извлекает ключевые параметры для формирования записей о сетевых потоках, которые временно хранятся в оперативной памяти с периодической очисткой устаревших записей с целью экономии ресурсов. Второй поток, работающий параллельно, в реальном времени измеряет общую пропускную способность сетевого моста и его физических интерфейсов.

Взаимодействие между потоками и доступ к общим структурам данных организованы с использованием стандартных механизмов синхронизации – мьютексов и условных переменных, что обеспечивает целостность и согласованность статистики в многопоточной среде. Кроме того, реализована поддержка обмена данными с внешними системами: собранные показатели могут предоставляться по запросу в формате JSON, что упрощает их дальнейшую обработку и визуализацию.

Разработанный комплекс демонстрирует собой эффективное решение для контроля и детального анализа сетевого трафика. Он обеспечивает не только надёжный сбор данных, но и их структурированную обработку, что позволяет повысить уровень контроля и безопасности сетевой инфраструктуры. Применение отечественной компонентной базы и свободно распространяемого программного обеспечения способствует снижению зависимости от зарубежных поставщиков и росту технологической независимости.

Внедрение подобных систем в эксплуатацию позволит системным администраторам и инженерам оперативно реагировать на инциденты, планировать пропускную способность и оптимизировать сетевую инфраструктуру с учётом реального трафика.

CONTROL SYSTEMS FOR INTELLIGENT ROBOTIC COMPLEXES

Б. М. Антипин, Е. М. Виноградов, О. Б. Мункуева

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВНУТРЕННИХ ПОМЕХ
РАДИОЭЛЕКТРОННОМУ ОБОРУДОВАНИЮ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
КОСТЮМА ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ**

Аннотация. Выполнен анализ источников внутренних помех радиоэлектронным элементам костюма телеприсутствия в виде экзоскелета. Показано, что основными источниками помех могут являться сигналы, «протекающие» в проводах экзоскелета, когда провода упакованы в жгуты без экранирования каждого отдельного провода. При этом помехи между проводами в жгуте могут возникать в результате взаимодействия как электрических, так магнитных полей, создаваемых токами, протекающими по этим проводам. Результаты анализа позволяют выполнить расчет уровней помеховых сигналов.

Ключевые слова: костюм телеприсутствия, источники внутренних помех, экзоскелет, электрическое взаимодействие, магнитное взаимодействие.

Для цитирования: Антипин Б. М., Виноградов Е. М., Мункуева О. Б. Анализ источников потенциальных внутренних помех радиоэлектронному оборудованию структурных элементов костюма телеприсутствия // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 156–158.

В. М. Antipin, E. M. Vinogradov, O. B. Munkueva

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications
Saint Petersburg, Russian Federation

**ANALYSIS OF SOURCES OF POTENTIAL INTERNAL INTERFERENCE
TO RADIOELECTRONIC EQUIPMENT OF STRUCTURAL ELEMENTS
OF THE TELEPRESENCE SUIT**

Abstract. The paper is devoted to the analysis of sources of internal interference to the radio-electronic elements of the telepresence suit in the form of an exoskeleton. It has been shown that the main sources of interference can be the signals that "flow" through the wires of the exoskeleton when the wires are tied together without shielding each individual wire. In this case, interference can occur both due to the electrical interaction between the wires in the bundle and due to the magnetic interaction. The results of the analysis allow for the calculation of the levels of interference signals.

Keywords: telepresence suit, internal interference sources, exoskeleton, electrical interaction, magnetic interaction.

For citation: Antipin B. M., Vinogradov E. M., Munkueva O. B. Analysis of sources of potential internal interference to radioelectronic equipment of structural elements of the telepresence suit // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 156–158.

Костюм телеприсутствия — это сложное периферийное устройство в виде экзоскелета с датчиками и приводами, которое позволяет оператору управлять аватаром или роботом в удалённом или виртуальном пространстве. Костюм оснащён пропорциональными датчиками углов, сил и ускорений, а также системой обратной связи, которая передаёт физические ощущения, такие как сопротивление и движение, что создаёт эффект реального присутствия. Датчики и приводы в костюме соединены проводами, количество которых может быть значительно. При этом, как правило, почти все провода собраны в отдельные жгуты, которые подводят сигналы к элементам экзоскелета – плечу, руке, кисти и др. В одном жгуте могут находиться провода, в которых сигналы управления поступают к приводам, и провода, в которых сигналы поступают от датчиков и по характеристикам сигналов можно определить текущее состояние элемента экзоскелета. При этом характеристики сигналов (частота, скважность, уровень и др.), а также их вид (цифровые, аналоговые) в проводах, как правило, различаются. Если провода в жгутах не экранированы, что имеет место в большинстве случаев, то могут возникнуть внутренние помехи радиоэлектронным элементам костюма из-за наводок от сигналов в близко расположенных проводах. Поэтому анализ источников внутренних помех, а также определение их уровней представляется актуальной задачей, решение которой является целью данной работы.

В рассматриваемой ситуации потенциальными источниками и рецепторами помех являются неэкранированные провода, объединенные в жгуты, в которых «проходят» сигналы с данными и сигналы управления. Поскольку провода могут как принимать, так и излучать электромагнитную энергию, то по существу они являются антеннами. Для провода, как для любой антенны, рассматривая ее диаграмму излучения, можно выделить три зоны: зону индукции, ближнюю зону излучения и дальнюю зону. Минимальное расстояние от провода до границы зоны индукции составляет около одной шестой длины волны сигнала, распространяющегося по этому проводу. Поскольку в жгуте провода соприкасаются изоляцией друг с другом, то все они находятся в зоне индукции. В зоне индукции практически отсутствует излучение электромагнитной энергии, а отношение напряженности электрического поля к напряженности магнитного поля зависит от расстояния. В этой зоне эти поля рассматриваются отдельно в отличие от дальней зоны, где электрическое и магнитное поля формируют единое электромагнитное поле плоской электромагнитной волны. Таким образом, для проводов, размещенных в одном жгуте, следует рассматривать отдельно помехи, создаваемые в них соседними проводами, обусловленные связью по электрическим и магнитным полям.

Электрическая помеха является результатом взаимодействия проводов по электрическому полю. Связь проводов по электрическому полю определяется значением паразитной емкости между проводами. На рис. 1 эта связь представлена паразитной емкостью C_{12} между проводами 1 и 2, где провод 1 выступает в качестве источника помехи, а провод 2 в качестве ее рецептора. C_{1G} и C_{2G} представляют соответственно емкости между проводом 1 и землей и проводом 2 и землей. Сопротивления R и R_1 являются нагрузками соответствующих линий, представленных проводами 1 и 2, и не являются паразитными компонентами. V_1 – напряжение, приложенное к проводу 1, а V_{nC} – напряжение помехи, создаваемое на нагрузке провода 2 проводом 1 через паразитную емкостную связь между проводами, которое может быть вычислено.

Каждый провод, когда по нему протекает электрический ток, создает вокруг себя магнитный поток, который пропорционален протекающему по нему току. Коэффициент пропорциональности есть индуктивность проводника. Индуктивность зависит от геометрии цепи, по которой протекает ток, и магнитных свойств среды, окружающей электрическую цепь. Когда ток одной цепи создает вокруг себя магнитный поток, в который

попадает вторая цепь, то во второй цепи возникает ток, который пропорционален взаимной индукции между проводами. Эту ситуацию отображает рис. 2.

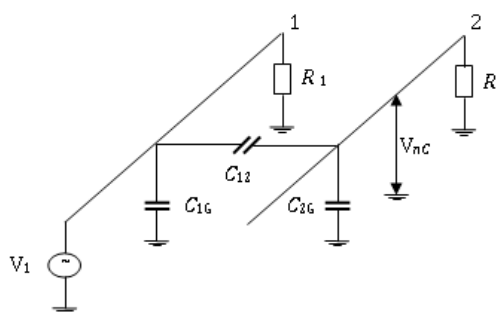


Рис. 1. Емкостная связь между проводами

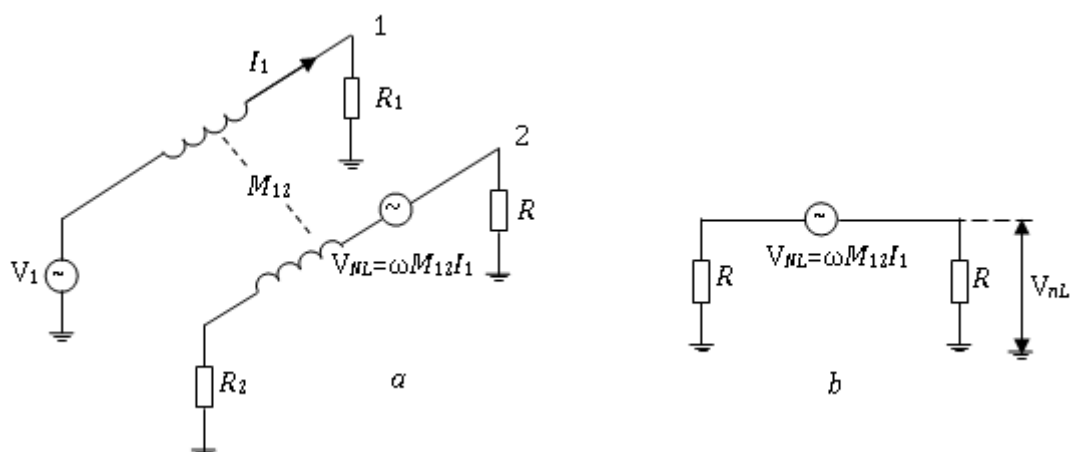


Рис. 2: а – магнитная связь двух цепей; б – эквивалентная схема магнитной связи

Рассмотренные эквивалентные схемы, поясняющие возникновение источников внутренних помех радиоэлектронному оборудованию структурных элементов костюма телеприсутствия, позволяют выполнить расчеты уровней помех как для случая электрического, так и магнитного взаимодействия сигналов в проводах. Результаты расчетов позволят оценить степень воздействия помех на функционирования структурных элементов костюма телеприсутствия.

Исследование выполнено в рамках выполнения ПНИ по государственному заданию СПбГУТ на 2025 год № 1362024/1024032900317-4-2.2.6;2.2.4-2.2.6;2.2.4.

А. И. Васильев

ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России

Мытищи, Российская Федерация

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. Рассматривается проблема оценки качества видеоинформации в реальном времени для систем управления робототехнических комплексов. Анализируются традиционные и современные методы, включая полнореференсные, нет-референсные и глубокое обучение. Предлагается гибридный подход, сочетающий объективные метрики с контекстно-зависимыми критериями, учитывающими специфику задачи робота (навигация, манипуляция, инспекция). Приводятся результаты моделирования, демонстрирующие эффективность предложенного подхода для повышения надежности принятия решений.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, качество видеоинформации, полно-референсная оценка, системы управления, четкость, семантическая целостность, оценка качества видео (VQA).

Для цитирования: Васильев А. И. Предложения по оценке качества видеоинформации в системах управления робототехнических комплексов // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 159–162.

A. I. Vasilyev

16 CSRTI, Mytishchi, Russian Federation

SUGGESTIONS FOR EVALUATING THE QUALITY OF VIDEO INFORMATION IN CONTROL SYSTEMS OF ROBOTIC COMPLEXES

Abstract. The article discusses the problem of assessing the quality of video information in real time for control systems of robotic complexes. Traditional and modern methods are analyzed, including full-reference, non-reference, and deep learning. A hybrid approach is proposed that combines objective metrics with context-sensitive criteria that take into account the specifics of the robot's task (navigation, manipulation, inspection). The simulation results are presented, demonstrating the effectiveness of the proposed approach to improve the reliability of decision-making.

Keywords: robotics complex, video information quality, full-reference assessment, control systems, clarity, semantic integrity, video quality assessment (VQA).

For citation: Vasilyev A. I. Suggestions for evaluating the quality of video information in control systems of robotic complexes // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 159–162.

Рост областей применения робототехнических комплексов (РТК, от автономных транспортных средств, безэкипажных кораблей и дронов до промышленных манипуляторов и роботов-спасателей) предъявляет повышенные требования к надежности систем технического зрения. Качество входной видеоинформации напрямую влияет на эффективность алгоритмов компьютерного зрения (CV), таких как детекция объектов (SLAM, Simultaneous Localization and Mapping) и семантическая сегментация. В статье рассматривается важнейшая задача оценки качества видео в реальном времени (VQA, video quality assessment) в контурах управления РТК. Производится анализ традиционных методов оценки и предлагается новая

иерархическая структура VQA. Это позволяет объединить низкоуровневую статистику обработки изображений с высокоуровневыми семантическими метриками, зависящими от задач, для обеспечения надежного принятия решений. Предлагаемый подход позволяет РТК динамически оценивать видеoinформацию и запускать соответствующие стратегии обеспечения качества, например, переключение режимов или постепенное изменение видеокодеков.

В реальных условиях видеoinформация подвержена различного рода искажениям: размытие из-за движения РТК или объекта наблюдения; шумы при низкой освещенности; атмосферные помехи (туман, дождь, снег); искажения при сжатии видеoinформации из-за ограниченной полосы пропускания; расфокусировка и блики на объективе, возникающие из-за физических ограничений камеры. Система управления РТК должна либо адаптироваться к этим искажениям, либо инициировать действия по их компенсации (например, изменить режим съемки, разрешение, частоту кадров, запросить данные с другой камеры).

Применяемые на сегодняшний день методы оценки качества видео, основанные на анализе характеристик сети, являются фактически теми же средствами, что используются для контроля качества передачи голосовой информации, т.е. они измеряют параметры транспортной сети. Объективные методы, в отличие от субъективных, не дают представления о том, что же на самом деле видит пользователь на экране, так как они, по сути, не делают различия между пакетами, переносящими видео и другую информацию. На сегодня отсутствуют общепринятые стандарты, специфицирующие введение какой-либо метрики, поэтому существует ряд методов и ещё больше метрик, которые существенно различаются между собой и базируются на разных подходах. В настоящее время применяются методы оценки качества видеoinформации:

- полная оценка качества эталонного видеоизображения (Full Reference Image Quality Assessment, FR-IQA). Оценка производится сравнением искаженного изображения/видео с эталонным. Применимость данных методов при оценке качества видеoinформации в РТК ограничена, так как эталонное изображение в реальных условиях функционирования РТК, как правило, отсутствует. Может использоваться на этапе калибровки и тестирования видеосистем;

- частичная оценка качества эталонного изображения (Reduced Reference Image Quality Assessment, RR-IQA). Подход, в котором декларируются переход от оценки всего видеокadra к оценке того, что важно пользователю. Например, оценка качества конкретного объекта видеонаблюдения, стриминга спортивных событий, текст в видеоряде. Таким образом, эталонное изображение используется не только для сравнения, но и как источник информации о семантической структуре видеокadra, процесс оценки качества становится управляемым, делая его более человеко-ориентированным;

- оценка качества изображения без эталонного изображения (No Reference Image Quality Assessment, NR-IQA). Оценка качества производится без наличия эталонного изображения. Наиболее практичный и востребованный подход для РТК;

- методы на основе глубокого обучения (Deep Learning-based). Используются нейронные сети, построенные на анализе связности между пикселями изображения для их обучения и последующей оценки качества видео.

К методам FR-IQA относятся:

- пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR, Peak Signal-to-Noise Ratio). Простая и широко используемая метрика, но плохо коррелирует с человеческим восприятием и непрактичен для робототехники реального времени, поскольку эталонный (нормированный) поток видео никогда не доступен в эксплуатации;

- индекс структурного сходства SSIM (Structural Similarity Index Measuring). Оценивает структурные искажения, лучше соответствует субъективному качеству. Индекс структурного сходства (SSIM) измеряет воспринимаемые изменения в структурной информации, яркости и контрасте, предлагая лучшую модель восприятия, чем PSNR;

- VMAF (Video Multimethod Assessment Fusion). Современная метрика от Netflix, сочетающая несколько алгоритмов и машинное обучение для видео.

К методам NR-IQA относятся:

- анализ статистических особенностей (Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator BRISQUE). Оценка по измерению резкости (через градиенты) изменений, например, зашумленности, контрастности. Метод может эффективно отражать состояние расфокусировки камер. Полученный вектор характеристик изображения позволяет в последующем обеспечить обучение и оценку модели машинного обучения;

- оценка естественного качества изображения (Natural Image Quality Evaluator, NIQE). Математический аппарат основан на статистике естественных сцен. Однако, в отличие от BRISQUE, который использует обученную модель на человеческих оценках, NIQE не требует обучения на субъективных данных. Он использует предварительно вычисленную модель из набора естественных изображений высокого качества;

- оценка качества изображения на основе восприятия (Perception-based Image Quality Evaluator, PIQE). Математический аппарат основан на анализе локальных областей изображения для выявления искажений (блочность, размытие) и их маскирующих эффектов. Указанные искажения характерны для видеокодеков (например, JPEG, H.264/265).

Рекомендации по выбору методов методов NR-IQA можно представить следующим образом:

BRISQUE - когда доступны данные для обучения и нужна высокая точность;

NIQE - для универсального использования без эталонных данных;

PIQE - когда важна скорость и интерпретируемость результатов.

Методы оценки качества видео на основе глубокого обучения (Deep Learning-based, DL) позволяют напрямую обучать модели на больших наборах данных с субъективными человеческими оценками (Mean Opinion Score, MOS) или (Differential Mean Opinion Score, DMOS), выявляя сложные, нелинейные зависимости между пикселями в видеопотоке и воспринимаемым качеством человеком. К ним относятся:

- комплексная оценка видео на основе архитектуры сверточных нейронных сетей (CNN) и рекуррентных нейронных сетей (RNN). В этом случае CNN извлекает пространственные признаки из каждого кадра, а RNN агрегирует их во временной последовательности. Данная архитектура особенно эффективна для оценки временной согласованности и плавности видео;

- оценка видео на основе трансформеров (Video Quality Transformer, VQT). Методы используют разбиение видео на пространственно-временные патчи, добавляет позиционное кодирование и использует механизм самовнимания для моделирования глобальных зависимостей как в пространстве, так и во времени.

Математический аппарат по оценке качества видео в настоящее время находится в постоянном развитии, очевидно показывая свои достоинства, в части способности выявлять сложные, нелинейные искажения и адаптироваться к конкретным сценам в реальном времени и недостатки в части требований к вычислительной сложности.

Для оценки видео в системах управления РТК предлагается применить гибридный подход с построением многоуровневой системой оценки:

Уровень 1, включающий сетевые метрики (например, скорость, задержка, джиттер).

На этом уровне решается задача мониторинга канала передачи данных, система управления РТК может переключиться на резервный канал связи, изменить длину передаваемых пакетов и т.д.

Уровень 2, включающий низкоуровневые (пиксельные) метрики (например, резкость, уровень шума, контраст и др.).

На этом уровне решается задача быстрой диагностики критических сбоев. В случае срабатывания метрик (выпадение из пороговых значений), система управления РТК может переключиться на резервную камеру, снизить скорость движения и т.д.

Уровень 3, включающий высокоуровневые (семантические) метрики (например, уверенность детекции, целостность восприятия и др.).

На этом уровне система способна определить надежность оценки качества видео на высоком уровне. Например, если уверенность детекции упала, РТК может перевестись в более осторожный режим движения (манипуляций).

Ожидается, что система управления РТК с оценкой качества видео способна демонстрировать более высокую надежность: реже сталкивается с препятствиями при ухудшении видимости, чаще корректно переключается на альтернативные сенсоры или стратегии, или ищет альтернативные пути действий.

Оценка качества видеоинформации должна быть неотъемлемой частью системы управления современным РТК. Предложенный гибридный подход, сочетающий быстрые низкоуровневые метрики с семантическими оценками, позволяет эффективно оценивать надежность визуальных данных и адаптировать поведение робота в реальном времени. Это повышает автономность, безопасность и надежность выполнения задач в неконтролируемых и изменяющихся условиях. Перспективы дальнейших исследований видятся в разработке легковесных нейросетевых моделей для оценки качества видео, оптимизированных для встраивания в бортовые вычислители роботов.

Т. Г. Васильева, В. Н. Лукьянчик

Военная академия связи им. С.М. Буденного, Санкт-Петербург, Российская Федерация

НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аннотация. Рассматривается значение РТК СН, возможности их применения для выполнения специальных задач, роль и место, требования, направления дальнейшего развития.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, управление, задачи, наземный, воздушный, дрон, беспилотный летательный аппарат.

Для цитирования: Васильева Т. Г., Лукьянчик В. Н. Настоящее и будущее робототехнических комплексов специального назначения // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025 С. 163–164.

T. G. Vasilyeva, V. N. Lukyanchik

¹Marshal Budyonny Military Signal Academy, Saint Petersburg, Russian Federation

THE PRESENT AND FUTURE OF SPECIAL-PURPOSE ROBOTIC SYSTEMS

Abstract. The article discusses the importance of special-purpose robotic systems, their capabilities for performing special tasks, their role and place, requirements, and future development directions.

Keywords: robotic system, control, tasks, ground, air, drone, unmanned aerial vehicle.

For citation: Vasilyeva T. G., Lukyanchik V. N. The Present and future of special-purpose robotic systems // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 163–164.

Роботизация является составной частью общего процесса повышения качественного уровня, существующего и создания нового оборудования, техники, отвечающих современным требованиям информационной эпохи, технологического и технического прорыва в отечественном строительстве и производственной сфере, рассматривается как одно из важнейших направлений совершенствования управления и способов применения оборудования и комплексов различного назначения.

Робототехнический комплекс – автономное мобильное техническое устройство, оснащённое средствами управления, комплексом навесного оборудования, предназначенного для выполнения специальных задач, а автоматическом или автоматизированном режиме в различных средах.

РТК могут являться как самостоятельным средством (объектом), так и (или) дополнять традиционное оборудование, комплексы, машины во всех сферах их применения при решении различных задач.

В РТК, исходя из решаемых задач, до 95 % функций, как правило, отводится роботу, связанной с обработкой информации, принятием решения и выполнением действий, а функции человека (экипажа) связаны с управлением исполнительными устройствами.

Развитию робототехники придаётся огромное внимание за рубежом, как создание

отдельных устройств, так и разработка станков (механизмов), аппаратов наземного, воздушного и морского базирования гражданского и военного назначения.

В Российской Федерации за последнее время ускоренно ведутся разработки по созданию РТК гражданского, двойного и специального назначения. Особенность и значимость РТК заключается в том, что они могут применяться там, где человеку не доступно, опасно и другое. Это может быть связано со строительством сложных объектов, а также работы, связанные с радиацией и т.д.

В МЧС находят применение различные виды и типы РТК: это воздушные аппараты (БПЛА), наземные комплексы и морские глубоководные аппараты. БПЛА применяются в ЧС для расчистки завалов как в процессе аварийных работ, при землетрясениях, а также при пожарах лесных массивов, облёт труднодоступной местности и других случаях. Наземные РТК используются при зачистке разрушений, завалов.

В ФСБ роботизированные комплексы (средства) используются при охране государственной границы, объектов и др.

В Вооруженных Силах РФ РТК находят самое широкое применение как в условиях мирного времени и возрастает их роль и место в бою и операциях.

Интенсивность применения и производство их произошло после февраля месяца 2025 года, после начала СВО, когда ВСУ активно применяли воздушные средства – дроны, морские – безэкипажные катера.

Исходя из решаемых задач и их основного предназначения, РТК могут быть объединены в группы: ударные, разведывательные, специальные.

Появление роботов делает возможным решение ряда задач, недоступных ранее. Целесообразным является применение РТК СН для решения всего спектра боевых и обеспечивающих задач. Однако при определении перечня таких задач необходимо иметь в виду их приоритетность, исходя из экономической и военной нецелесообразности продолжения их выполнения традиционными способами (в силу высоких потерь личного состава).

Разработка и внедрение технологий специальной (военной) робототехники является одним из приоритетных направлений создания новых и модернизации существующих образцов вооружения и специальной техники. Роботизация представляет собой комплекс взаимосвязанных специальных и военно-технических мер, направленных на повышения эффективности выполнения задач (ведения боевых действий).

Дальнейшее развитие роботов СН направлено на повышение эффективности применения, совершенствование системы управления, навесного (встроенного.) оборудования, внедрение прорывных технологий.

Ф. Р. Набиев, А. М. Воронцов, П. С. Ложников, С. С. Лутченко

Омский государственный технический университет

Омск, Российская Федерация

САМООРГАНИЗУЮЩАЯСЯ СИСТЕМА ЦИФРОВОГО ОБРАЗА ЗАВОДА КАК ИНСТРУМЕНТ БЫСТРОГО РАЗВЁРТЫВАНИЯ

Аннотация. Самоорганизующиеся сети в промышленной автоматизации обеспечивают децентрализованный сбор телеметрии и управления, повышая эффективность на 25%. Рассмотрены топологии (mesh, star, hybrid, cluster-tree, ad-hoc) и оборудование (сенсоры, шлюзы), интегрируемые с ПК через 5G и AI/ML для предиктивной диагностики производств.

Ключевые слова: самоорганизующиеся сети, Industry 4.0, Industrial IoT, топологии сетей, mesh-топология, star-топология, hybrid-топология, cluster-tree, ad-hoc топология, WirelessHART, LoRaWAN, Bluetooth, сенсоры, шлюзы, SCADA/DCS, AI/ML, 5G, edge computing, self-healing, self-configuration, предиктивная диагностика, smart factories, автоматизация, телеметрическая информация.

Для цитирования: Набиев Ф. Р., Воронцов А. М., Ложников П. С., Лутченко С. С. Самоорганизующаяся система цифрового образа завода как инструмент быстрого развёртывания // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 165–166.

F. R. Nabiev, A. M. Vorontsov, P. S. Lozhnikov, S. S. Lutchenko

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

SELF-ORGANIZING PLANT DIGITAL IMAGE SYSTEM AS A RAPID DEPLOYMENT TOOL

Abstract. Self-organizing networks in industrial automation provide decentralized collection of telemetry and management, increasing efficiency by 25%. The article discusses topologies (mesh, star, hybrid, cluster-tree, ad-hoc) and equipment (sensors, gateways) integrated with PCs via 5G and AI/ML for predictive diagnostics.

Keywords: self-organizing networks, Industry 4.0, Industrial IoT, network topologies, mesh topology, star topology, hybrid topology, cluster tree, ad-hoc topology, WirelessHART, LoRaWAN, Bluetooth, sensors, gateways, SCADA/DCS, AI/ML, 5G, edge computing, self-healing, self-configuration, predictive diagnostics, smart factories, automation, telemetry information.

For citation: Nabiev F. R., Vorontsov A. M., Lozhnikov P. S., Lutchenko S. S. Self-organizing plant digital image system as a rapid deployment tool // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 165–166.

В данной работе рассмотрены топологии децентрализованных сетей, выявлены их особенности и области применения. Для критичных задач, таких как мониторинг трубопроводов в нефтехимической отрасли или диагностика оборудования в энергетике, оптимальна mesh-топология и самовосстановление при сбоях, несмотря на повышенное энергопотребление. Для больших территорий, таких как склады или логистические центры, предпочтительна star-топология, минимизирующая энергозатраты и задержки, но уязвимая к отказам шлюза. В сложных заводских средах с комбинацией стационарного и мобильного оборудования эффективна hybrid-топология, балансирующая скорость и

масштабируемость. Cluster-tree подходит для лёгкой промышленности, например, контроля температуры на пищевых производствах, благодаря энергоэффективности, но менее устойчива к интерференции. Ad-hoc топология идеальна для временных сценариев, таких как мониторинг на строительных площадках, но её низкая предсказуемость ограничивает использование в критичных процессах. В 2025 году mesh- и hybrid-топологии доминируют в smart factories благодаря интеграции с 5G и AI-driven оптимизацией, обеспечивая задержки менее 100.

Самоорганизующиеся сети используют специализированное оборудование: сенсоры, активаторы и шлюзы, работающие на протоколах WirelessHART, LoRaWAN или Bluetooth (IEEE 802.15.1). Сенсоры автоматически формируют маршруты энергоэффективностью работы на батарее. Шлюзы передают данные на ПК через Ethernet, 5G или OPC UA для анализа в SCADA/DCS, где AI/ML выявляет аномалии для предиктивной диагностики. Функция self-healing защищает сеть от сбоев, а интеграция с 5G в 2025 году усиливает реальное время управления.

Самоорганизующиеся сети обеспечивают гибкость, надёжность и энергоэффективность в системах цифрового управления заводами, снижая затраты на обслуживание и простои. Выбор топологии — mesh, star, hybrid, cluster-tree или ad-hoc — зависит от специфики предприятия, с mesh и hybrid в приоритете для критичных задач благодаря их устойчивости и интеграции с 5G/AI. В 2025 году SON становятся ключевым элементом smart factories, поддерживая автоматизацию и предиктивную диагностику, что делает их незаменимыми для Industry 4.0.

И. Н. Новоселов¹, Д. Ю. Пономарёв¹, А. В. Фарафонов², М. М. Молоков¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация

²Военный институт (научно-исследовательский) ВКА имени А.Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Российская Федерация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ SCADA-СИСТЕМ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ, ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КА И ОБРАБОТКИ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. Рассматриваются возможности, преимущества и недостатки современных SCADA-систем с целью использования их для решения задач управления, технической диагностики КА и обработки целевой информации, подчёркивая возможности унификации программного обеспечения, используемого в технологических циклах наземного контура управления космическими аппаратами.

Ключевые слова: МКА, SCADA-система, космические системы, диагностика, унификация.

Для цитирования: Новоселов И. Н., Пономарёв Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М. Использование возможностей SCADA-систем при решении задач управления, диагностики технического состояния КА и обработки целевой информации // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 167–168.

I. N. Novoselov¹, D. U. Ponomarev¹, A. V. Farafonov², M. M. Molokov¹

¹ERA Military Innovation Technopolis, Anapa, Russian Federation

²Military (Scientific-Research) Institute of Mozhaisky Military Aerospace Academy,
Saint Petersburg, Russian Federation

USING THE CAPABILITIES OF SCADA SYSTEMS IN SOLVING CONTROL TASKS, TECHNICAL DIAGNOSTICS OF SPACECRAFT AND TARGET INFORMATION PROCESSING

Abstract. The article examines the capabilities, advantages and disadvantages of modern SCADA systems with a view to their use in solving problems of spacecraft control, technical diagnostics and processing of target information, emphasizing the possibilities of unification of software used in technological cycles of ground-based control loops for spacecraft.

Keywords: small spacecraft, SCADA system, space systems, diagnostics, standardization.

For citation: Novoselov I. N., Ponomarev D. U., Farafonov A. V., Molokov M. M. Using the capabilities of SCADA systems in solving control tasks, technical diagnostics of spacecraft and target information processing // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 167–168.

Введение

Развитие – применение современных информационных технологий. Современные технологии позволяют разрабатывать и создавать космические системы, состоящие из большого количества КА малых классов (МКА), произведенных предприятиями ракетно-космической отрасли конвейерными методами. Однако вместе с ростом числа МКА в таких системах возрастает сложность обработки и анализа лавинообразно возрастающего информационного обмена как по линии КА-НКУ, так и массивов данных диагностической и целевой информации отдельных КА и системы в целом. В настоящее время отсутствует унификация процессов сбора и анализа этих информационных мас-

сиров, что приводит к этой информации. Важный аспект космонавтики это сбор диагностических данных с КА для принятия решений продление времени его эксплуатации. А также сбор с него целевой информации.

Основные решения

Одним из путей решения этой проблемы является принятие положительного опыта с промышленной отрасли по использованию SCADA систем, которые используются не посредственно на каждом предприятии. Она помогает собирать и анализировать данные, принимать решение по сохранение эффективности производственного процесса.

Сегодня российские разработчики создают собственные SCADA-решения, способные обеспечить надежную и эффективную обработку больших объемов данных. Такие системы позволят значительно упростить и ускорить процессы мониторинга и управления КА, одновременно снижая нагрузку на специалистов наземного контура управления, снижая временные и технологические затраты на перенастройку системы при изменении различных параметров и повышая точность аналитической обработки информации.

SCADA-системы традиционно применялись в промышленности для управления и мониторинга сложных технологических процессов. В настоящее время сфера их применения расширяется, охватывая всё больше областей. Однако в существующей практике функционирования космической отрасли, а особенно при решении задач управления орбитальной группировкой, SCADA-системы не нашли своё широкого применения. Зачастую используется ПО собственной разработки, заново создаваемое при организации решения каждой новой задачи, что приводит к существенному увеличению стоимостных и временных затрат.

Заключение

Интеграция российских SCADA-систем в диагностику и управление МКА представляет собой стратегически важное направление развития отечественной космической отрасли. Данное решение позволит оптимизировать затраты на обслуживание и эксплуатацию МКА, увеличить срок их активного функционирования, а также существенно повысить надёжность и безопасность космических задач.

Благодаря централизованному контролю и автоматизированной обработке данных SCADA-системы способствуют быстрому выявлению и устранению потенциальных неисправностей, что снижает риск возникновения внештатных ситуаций и повышает общую эффективность работы малых космических аппаратов. Это, в свою очередь, даёт возможность Российской Федерации уверенно конкурировать на международной арене и занимать лидирующие позиции в космической отрасли.

Таким образом, активное продвижение российских SCADA-систем в космонавтике не только решает практические задачи управления малыми космическими аппаратами, но и играет ключевую роль в обеспечении национального суверенитета и повышении конкурентоспособности Российской экономики в глобальном масштабе.

С. А. Покотило

Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Аннотация. Описана апробированная на практике технология экспериментального определения линейного разрешения на местности оптико-электронной системы дистанционного зондирования и вероятностных характеристик обнаружения и распознавания объектов по изображениям, полученным оптико-электронной системой наблюдения. Приведены аппроксимирующие зависимости вероятностей распознавания объектов от величины линейного разрешения на местности по их аэроснимкам.

Ключевые слова: линейное разрешение на местности, оптико-электронная система наблюдения, вероятность обнаружения, вероятность распознавания.

Для цитирования: Покотило С. А. Экспериментальная оценка качества оптико-электронных систем дистанционного зондирования // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия), Омск : ОНИИП, 2025. С. 169–171.

S. A. Pokotilo

ERA Military Innovation Technopolis, Anapa, Russian Federation

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE QUALITY OF OPTOELECTRONIC REMOTE SENSING SYSTEMS

Abstract. The article describes a proven technology for experimentally determining the linear resolution of an optoelectronic remote sensing system and probabilistic characteristics of object detection and recognition based on their images. The paper presents approximating dependences of object recognition probabilities on the linear terrain resolution of their aerial images.

Keywords: linear terrain resolution, optoelectronic remote sensing system, detection probability, recognition probability.

For citation: Pokotilo S. A. Experimental assessment of the quality of optoelectronic remote sensing systems // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 169–171.

Качество оптико-электронных систем дистанционного зондирования (наблюдения – ОЭСН) определяется их разрешающей способностью, однозначно связанной с линейным разрешением на местности. В области испытаний этих систем важнейшей задачей является экспериментальное определение их линейного разрешения на местности, от значения которого напрямую зависит вероятность распознавания объектов наблюдения по их аэроснимкам.

В известном способе определения линейного разрешения оптико-электронных систем наблюдения по изображениям тест-объекта – миры в видимом и в инфракрасном диапазонах оптического излучения в качестве тест-объекта используют штриховую миру, установленную вдоль и поперёк направления полёта носителя оптико-электронной аппаратуры. Они заключаются в установке миры на местности, выполнении аэросъёмки миры при заданных значениях высоты полёта и курса летательного аппарата с

установленной на нём оптико-электронной системой наблюдения, формировании изображений миры и вычислении оценки линейного разрешения на местности оптико-электронной системы наблюдения как среднего арифметического значений оценок, полученных всеми операторами-дешифровщиками по изображениям всех штриховых групп миры, каждая из которых характеризуется минимальной шириной штриха в распознанных группах штрихов, в которых все штрихи наблюдаются раздельно по всей их длине. В качестве миры использована стандартная штриховая мира, состоящая из 19 групп штрихов, расположенных в порядке возрастания ширины штрихов; каждая группа включает в себя 2 подгруппы из 3 прямоугольных и параллельных друг другу штрихов различных размеров с соотношением сторон 5:1.

Недостатком описанного способа является высокая стоимость эксперимента, обусловленная необходимостью выполнения нескольких единиц-десятков пролётов летательного аппарата с установленной на нём оптико-электронной системой над миром на разных высотах и при разных значениях курса для получения серии аэроснимков, подлежащих последующему дешифрированию.

Цель исследования – предложить технологию экспериментального определения линейного разрешения на местности и вероятностных характеристик обнаружения и распознавания объектов по их аэроснимкам, обеспечивающую снижение стоимости и сокращение времени проведения такого эксперимента.

Сущность предлагаемой технологии экспериментального определения линейного разрешения на местности оптико-электронной системы наблюдения заключается в установке оптико-электронной системы наблюдения, снабжённой объективом с изменяемым фокусным расстоянием, на беспилотный летательный аппарат коптерного класса, выполнении аэросъёмки тест-объекта в виде штриховой миры, состоящей из 19 квадратных штриховых групп, каждая из которых состоит из 4 групп штрихов, по три штриха одинаковой длины и ширины в каждой группе, с соотношением длины и ширины 5:1, с шириной штрихов в наборах миры 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 м, при различных значениях фокусного расстояния f , с наибольшего до наименьшего значения через равные промежутки $\Delta f = \text{const}$, при постоянной высоте аэросъёмки, регистрации, с возможностью последующей визуализации, полученных аэроснимков, дешифрировании полученных аэроснимков группой операторов-дешифровщиков с определением вероятностей обнаружения и распознавания изображений тест-объекта, построением экспериментальных зависимостей вероятностей распознавания изображений тест-объекта от величины линейного разрешения на местности и аппроксимацией полученных экспериментальных зависимостей известными аналитическими функциями, при этом в качестве оптико-электронной системы наблюдения может быть использован цифровой аэрофотоаппарат, цифровая телевизионная система или цифровая тепловизионная система.

Предлагаемая технология осуществления такого эксперимента основана на применении цифрового аэрофотоаппарата или оптико-электронной системы со смотрящей (фокальной) матрицей, снабжённых объективом с переменным фокусным расстоянием, или вариообъективом. В этом случае изменение высоты аэросъёмки и несколько единиц-десятков пролётов носителя с установленной на нём системой наблюдения над тест-объектом заменяется аэросъёмкой с некоторой постоянной высоты оптико-электронной системой, оснащённой объективом с дискретно изменяемым в заданных пределах фокусным расстоянием.

Предлагаемая технология реализуется в следующей последовательности.

1. Аэросъёмка тест-объекта при различных значениях дискретно изменяемого фокусного расстояния.
2. Регистрация, с возможностью визуализации, полученных аэроснимков.

3. Дешифрирование полученных изображений с занесением результатов в таблицу.
4. Вычисление среднего арифметического значения разрешающей способности, полученного каждым дешифровщиком по каждому дешифрованному изображению.
5. Определение ширины штриха, соответствующего разрешающей способности оптико-электронной системы.
6. Вычисление значения линейного разрешения на местности оптико-электронной системы, соответствующего среднему арифметическому значению разрешающей способности.

В процессе дешифрирования изображений реальных объектов наблюдения различают несколько категорий распознавания, например: «О» – обнаружение; «В» – распознавание объекта до вида; «К» – распознавание объекта до класса; «Т» – распознавание объекта до типа. В этом случае в технологию определения линейного разрешения на местности добавляют ещё два этапа:

7. Построение экспериментальных зависимостей вероятностей обнаружения и распознавания объекта по его изображению;
8. Аппроксимация экспериментальных зависимостей вероятностей обнаружения и распознавания объекта от величины линейного разрешения на местности известными аналитическими функциями.

На рисунке в качестве примера изображены типичные графики зависимости вероятностей $P_p(d)$ распознавания объекта от линейного разрешения d на местности; $d_{\text{мо}}$, $d_{\text{мв}}$, $d_{\text{мк}}$, $d_{\text{мт}}$ – значения линейного разрешения, при которых вероятность распознавания объекта по его изображению равна единице, соответственно, для вероятностных характеристик распознавания изображений объекта до вида – $d_{\text{мв}}$, класса – $d_{\text{мк}}$ и типа – $d_{\text{мт}}$.

Типичные зависимости вероятностей распознавания объектов от линейного разрешения на местности (вертикальными отрезками обозначены доверительные интервалы)

Предложенная технология экспериментального определения линейного разрешения на местности оптико-электронных систем наблюдения и вероятностных характеристик обнаружения и распознавания объектов по их аэроснимкам, полученным с помощью оптико-электронных средств наблюдения, обеспечивает существенную экономию материальных и временных затрат на получение конечного результата – зависимостей вероятностей обнаружения и распознавания объектов наблюдения по их изображениям от величины линейного разрешения на местности.

К. О. Симонов, О. С. Коняева

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
Самара, Российская федерация

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ**

Аннотация. Автоматизация контроля качества в производстве железобетонных изделий является важным направлением развития строительной индустрии. Ручные методы испытаний бетонных образцов отличаются высокой трудоёмкостью и зависимостью от человеческого фактора, что снижает достоверность и воспроизводимость результатов. Предлагаемая система Интернета вещей с тензодатчиками и электронной базой данных обеспечивает автоматизированное хранение, мониторинг и учёт образцов, минимизируя ошибки и повышая эффективность лабораторных испытаний. Решение ориентировано на предприятия малого и среднего масштаба и имеет импортозамещающий характер, так как базируется на отечественных компонентах и программном обеспечении.

Ключевые слова: автоматизация, технический контроль, система Интернета вещей, железобетонные конструкции, импортозамещение.

Для цитирования: Симонов К. О., Коняева О. С. Система управления процессом контроля качества на предприятиях по производству железобетонных изделий на основе технологии Интернета вещей // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 172–174.

К. О. Simonov, O. S. Konyaeva

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
Samara, Russian Federation

**QUALITY CONTROL MANAGEMENT SYSTEM
FOR REINFORCED CONCRETE PRODUCT MANUFACTURING ENTERPRISES
BASED ON INTERNET OF THINGS TECHNOLOGY**

Abstract. Automation of quality control in reinforced concrete production is an essential trend in the construction industry. Manual testing of concrete specimens remains labor-intensive and highly dependent on the human factor, which reduces accuracy and repeatability. The proposed Internet of Things Technology based system with load cells and an electronic database enables automated storage, monitoring, and recording of samples, minimizing errors and improving laboratory efficiency. The solution is designed for small and medium-sized enterprises and represents an import-substituting alternative, as it relies on domestic components and software.

Keywords: automation, technical control, Internet of Things Technology system, reinforced concrete structures, import substitution.

For citation: Simonov K. O., Konyaeva O. S. Quality control management system for reinforced concrete product manufacturing enterprises based on Internet of things technology // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 172–174.

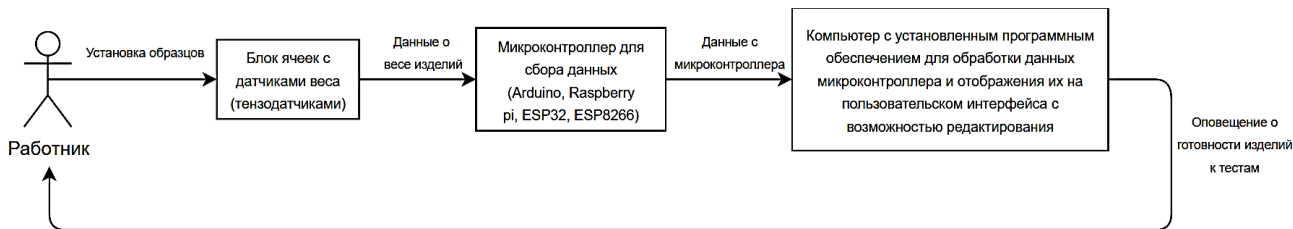
Автоматизация процессов контроля качества на предприятиях по производству железобетонных изделий представляет собой одно из приоритетных направлений раз-

вития строительной индустрии. В условиях повышения требований к надежности строительных конструкций особое значение приобретает совершенствование методик испытаний контрольных образцов бетона. Несмотря на наличие международных и отечественных стандартов, практическая реализация испытаний на сжатие в большинстве лабораторий выполняется вручную. Это приводит к снижению воспроизводимости и достоверности результатов вследствие человеческого фактора, несоблюдения регламентных сроков выдержки, ограниченной пропускной способности лабораторий и отсутствия цифровой прослеживаемости данных.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода к цифровым методам контроля качества, обеспечивающим повышение точности, оперативности и прозрачности испытаний. Целью работы является разработка и обоснование механизма автоматизации контроля прочностных характеристик железобетонных образцов на основе технологий Интернета вещей, направленного на минимизацию ошибок ручного режима и интеграцию процессов контроля в цифровую инфраструктуру предприятия.

Предлагаемое решение основано на применении распределённой системы Интернета вещей с ячеечной структурой хранения бетонных кубов. Каждая ячейка оснащена тензодатчиками для непрерывного контроля массы, данные с которых поступают через микроконтроллер в электронную базу. В системе фиксируются ключевые параметры: дата изготовления, марка и класс бетона, масса до и после выдержки, срок проведения испытаний.

Программное обеспечение предусматривает пользовательский интерфейс для ввода характеристик образца, автоматический запуск таймеров выдержки, а также систему уведомлений, сигнализирующую о наступлении контрольных сроков. По завершении хранения осуществляется повторное взвешивание с автоматической регистрацией результатов в цифровом журнале.



Структура системы

По сравнению с зарубежными аналогами, ориентированными на полную роботизацию, предлагаемая система характеризуется компактностью, модульностью и доступностью, что делает её применимой для предприятий среднего и малого масштаба. Важным аспектом является то, что разработка представляет собой инструмент импортозамещения: предлагаемый механизм использует отечественные комплектующие и программное обеспечение, обеспечивая независимость от зарубежных поставщиков и адаптацию к специфике российских производств.

Основные преимущества разработки заключаются в минимизации влияния человеческого фактора, обеспечении воспроизводимости испытаний, сокращении трудоёмкости процессов и создании централизованной базы данных. Внедрение системы позволит повысить эффективность деятельности лабораторий технического контроля, снизить затраты на проведение испытаний и обеспечить сквозную цифровизацию производственного цикла.

Научная новизна заключается в совмещении технологий Интернета вещей, цифрового мониторинга и автоматического контроля регламентов хранения в единой архи-

тектуре, не требующей дорогостоящей роботизации. Научная значимость состоит в формировании модели автоматизированного управления технологическим циклом контроля прочности железобетонных изделий, которая может быть масштабирована на иные участки производства железобетонных строительных конструкций, а также применена в образовательной и исследовательской деятельности.

Р. Ю. Сухарев

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет
Омск, Российская Федерация

КОНЦЕПЦИЯ БЕСПИЛОТНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЯЗИ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Приведена концепция роботизированной платформы, перечислены задачи, которые она должна выполнять. Представлена структурная схема системы автономного управления.

Ключевые слова: беспилотный, автономный, платформа, система, управление.

Для цитирования: Сухарев Р. Ю. Концепция беспилотной роботизированной платформы для обеспечения связи в сложных условиях // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 175–177.

R. Y. Sukharev

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russian Federation

THE CONCEPT OF AN UNMANNED ROBOTIC PLATFORM FOR PROVIDING COMMUNICATION IN DIFFICULT CONDITIONS

Abstract. The report presents the concept of a robotic platform, and lists the tasks it should perform. The structural scheme of the autonomous control system is presented.

Keywords: unmanned, autonomous, platform, system, control.

For citation: Sukharev R. Y. The concept of an unmanned robotic platform for providing communication in difficult conditions // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 175–177.

Обеспечение нужд связи в сложных условиях зачастую связано с риском для здоровья и жизни обслуживающего персонала. Решением данной проблемы может стать применение беспилотных роботизированных платформ, способных самостоятельно выйти на нужные координаты и развернуть необходимое оборудование.

На сегодняшний день на рынке представлено некоторое количество беспилотных платформ, но они в основном спроектированы для обеспечения складской и внутризаводской логистики.

Учитывая сложные условия использования предлагаемого концепта, в качестве ходового оборудования предлагается использовать гусеничный ход с возможностью бортового поворота.

Внешний вид предлагаемого концепта беспилотной роботизированной платформы представлен на рис. 1.

Описание платформы

Основная конструкция платформы выполнена на базе гусеничного ходового устройства, что обеспечивает высокую проходимость по различным типам местности. Корпус платформы изготовлен из прочных материалов (например, алюминиевого сплава или стали) для выдерживания значительных нагрузок.

Верхняя часть платформы представляет собой ровную площадку с антискользящим покрытием для безопасной фиксации грузов. Площадка оснащена креплениями (например, ремнями, стяжками или шкворнями) для надежной фиксации перевозимых объектов. На платформе установлены антенны связи и/или оборудование для радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Это может включать: электромагнитные помехи для защиты от радаров и датчиков; систему подавления сигналов радиосвязи противника; защиту от беспилотников и других электронных устройств; антенны могут быть расположены на верхней части платформы или интегрированы в корпус.



Рис. 1. Внешний вид беспилотной роботизированной платформы

Платформа способна транспортировать лежачих людей (вместе с медицинскими носилками), боеприпасы (в защищенном контейнере), различные грузы (строительные материалы, продовольствие, техническое оборудование).

Платформа может быть как управляемой дистанционно, так и автономной по собственному радиоканалу. Встроенные датчики и камеры обеспечивают мониторинг окружающей среды и контроль за состоянием груза.

Гусеницы приводятся в движение электродвигателями, что обеспечивает бесшумную работу и экономию энергии. Батареи или аккумуляторы обеспечивают автономное питание платформы. Для выполнения всех поставленных задач платформа должна быть оснащена системой автономного управления.

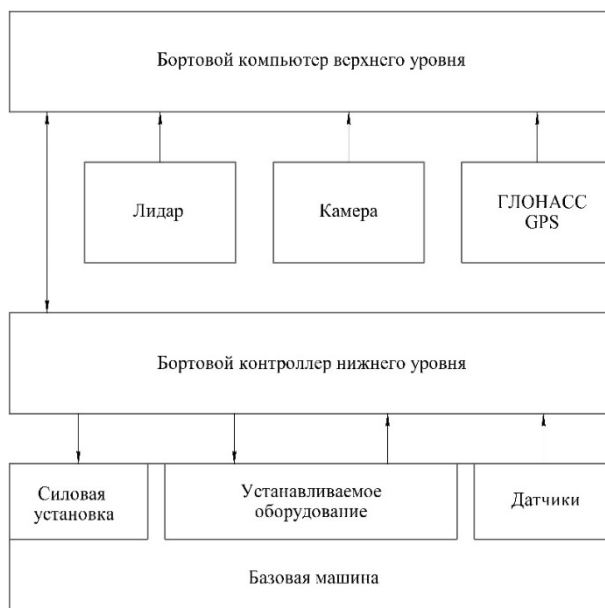


Рис. 2. Структурная схема системы автономного управления беспилотной роботизированной платформы

На основании предшествующих исследований была предложена структурная схема системы автономного управления беспилотной роботизированной платформы (рис. 2). Система, представленная на рис. 2, является двухуровневой. Верхний уровень представлен бортовым компьютером. В его задачи входит наиболее сложные и требовательные процессы:

- обработка информации с лидара, камеры и сигналов ГНСС;
- реализация метода построения траектории;
- определения вектора состояния платформы;
- выработка управляющих сигналов на управление базовой машиной;
- картографирование пройденного пути.

Заключение

В настоящее время концепция предлагаемой беспилотной роботизированной платформы проходит стадию НИОКР в совместной научно-исследовательской лаборатории «Робототехника и мехатроника» СибАДИ и ОНИИП.

Направлениями дальнейших исследований являются:

- разработка конструкции платформы;
- разработка программного обеспечения верхнего и нижнего уровней системы управления;
- проведение исследований модели на симуляторе.

А. А. Березкин, А. А. Ченский

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДЕРЖЕК И ПОТЕРЬ КАДРОВ FPV-ВИДЕОПОТОКА В НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЕ STARLINK ПРИ УПРАВЛЕНИИ БПЛА

Аннотация. Для управления беспилотными воздушными судами от первого лица необходима передача видеопотока в режиме реального времени со стороны беспилотного воздушного судна. Управление от первого лица в труднодоступных районах может проводиться через спутниковый сегмент гибридных орбитально-наземных сетей связи. В работе исследуется зависимость задержек и потерь кадров FPV-видеопотока от их размера при передаче видеопотока по низкоорбитальной системе спутниковой связи Starlink.

Ключевые слова: видеопоток, задержка видеопотока, канал информационного обмена, беспилотное воздушное судно, беспилотный летательный аппарат, FPV-управление, нейросетевой кодек, низкоорбитальная система спутниковой связи.

Для цитирования: Березкин А. А., Ченский А. А. Исследование прикладных задержек и потерь кадров FPV-видеопотока в низкоорбитальной спутниковой системе Starlink при управлении БПЛА // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 178–180.

A. A. Berezkin, A. A. Chenskiy

Saint Petersburg Bonch-Bruевич State University of Telecommunications
Saint Petersburg, Russian Federation

RESEARCH OF FPV VIDEO STREAM APPLICATION LAYER FRAME LATENCY AND LOSSES IN STARLINK LOW EARTH ORBIT SATELLITE NETWORK WHEN CONTROLLING UAVS

Abstract. For first-person control of unmanned aerial vehicles, it is necessary to transmit a real-time video stream from the unmanned aerial vehicle. First-person control in remote areas can be performed via the satellite segment of hybrid orbital-terrestrial communication networks. This paper investigates the dependence of FPV video stream frame delays and losses on the frame size when transmitting a video stream over the Starlink low-orbit satellite communication system.

Keywords: video stream, video stream latency, information exchange channel, unmanned aerial vehicle, first person view control, FPV control, neural codec, low Earth orbit satellite network.

For citation: Berezkin A. A., Chenskiy A. A. Research of FPV video stream application layer frame latency and losses in Starlink low Earth orbit satellite network when controlling UAVs // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 178–180.

Введение

Беспилотные авиационные системы (БАС) состоят из беспилотного воздушного судна (БВС, также иногда называется беспилотным летательным аппаратом – БПЛА), станции внешнего пилота (СВП), устройств передачи, линии связи с землёй и линии связи с бортом. Линии связи с землёй и бортом на прикладном уровне можно рассматривать как каналы информационного обмена (КИО) между БВС и СВП.

Управление от первого лица (FPV-управление), реализуемое в рамках БАС, представляет собой разновидность управления БВС, при которой внешний пилот (ВП) на основе видеопотока с камеры, установленной на БВС, формирует и передаёт команды управления.

Согласно Стратегии развития отрасли связи до 2035 года, утверждённую постановлением правительства от 24 ноября 2023 года №3339-р, FPV-управление на всей территории Российской Федерации станет доступным посредством гибридных орбитально-наземных сетей связи (ГОНСС), которые включают в себя наземный и космический сегменты.

Таким образом, возникает задача оценки возможности и характеристик FPV-управления БВС через космический сегмент ГОНСС. В настоящей работе рассматривается частная задача оценки характеристик передачи видеопотока FPV-управления через низкоорбитальную систему спутниковой связи. В качестве низкоорбитальной системы спутниковой связи рассматривается спутниковая система Starlink. В качестве исследуемых характеристик передачи видеопотока выступают *прикладная задержка кадров* видеопотока и *потери кадров*.

Методика эксперимента

В работе «Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена наземного сегмента гибридной сети связи при FPV-управлении БАС» (Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 1. С. 7-17.) рассматривались задержки и потери при передаче FPV-видеопотока через наземный сегмент ГОНСС (мобильные сети связи поколений 3G/LTE) на территории Российской Федерации. Методика исследования настоящего исследования базируется на методике того исследования (рис. 1).



Рис. 1. Схема эксперимента

Функции БВС и СВП имитируются двумя ПК: ПК-А и ПК-Б. На ПК-А генерируется

случайная полезная нагрузка *payload* размером от 100 до 15000 байт, делится на сегменты по 1385 байт. Пакеты отправляются через КИО на ПК-Б с интервалом 1 мс по транспортному протоколу UDP и возвращаются на ПК-А (рис. 2).



Рис. 2. Процесс измерения задержки

Результаты эксперимента

Как показали результаты эксперимента, математическое ожидание и наиболее вероятное значение задержки кадров видеопотока близки (рис. 3). При $payload \in (0; 2000]$ математическое ожидание задержки колеблется от 190 до 205 мс. При $payload \in (2000; 8000]$ возникают колебания математического ожидания задержки между 205 и 230 мс. При увеличении полезной нагрузки задержка стремится к 230 мс.

При $payload \in (0; 5000]$ потери кадров видеопотока низки и изменяются между 1% и 5% (рис. 4). При большей полезной нагрузке потери резко увеличиваются и колеблются от 7% до 16%.

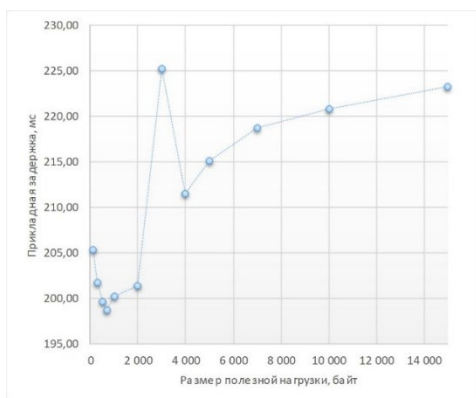


Рис. 3. Задержки кадров видеопотока

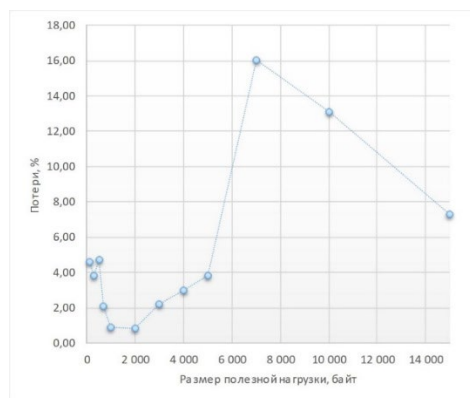


Рис. 4. Потери кадров видеопотока

Заключение

В настоящей работе рассмотрены задержки и потери кадров видеопотока FPV-управления БВС на прикладном уровне при использовании в качестве КИО низкоорбитальных систем спутниковой связи, относящиеся к космическому сегменту ГОНСС.

Задержки кадров видеопотока варьируются от 193 мс ($payload = 100$ байт) до 225 мс ($payload = 3000$ байт). Потери кадров видеопотока варьируются от 1% (при $payload$ 1000 и 2000 байт) до 16% ($payload = 5000$ байт).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, соглашение № 071-03-2025-005, "Прикладные научные исследования в области создания и развития систем телеметрии, управления и связи для беспилотных авиационных систем на период до 2030 года с учетом импортозамещения" (регистрационный номер ПТНИ: 1024032900105-1).

С. Ю. Землянухин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Томск, Российская Федерация

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ АЛГОРИТМОВ ПРЕКОДИРОВАНИЯ В НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. Исследована эффективность линейных алгоритмов прекодирования для подавления межпользовательских помех в низкоорбитальной спутниковой системе с многопользовательской технологией MIMO. Проведен сравнительный анализ алгоритмов Block Diagonalization Zero Forcing (BDZF) и Dirty Paper Coding (DPC) для реалистичной модели канала связи. Получено превосходство DPC над BDZF до 30 дБ по отношению энергии бита к спектральной плотности мощности шума при одинаковых значениях вероятности битовой ошибки.

Ключевые слова: спутниковая связь, MU-MIMO, межпользовательские помехи, блочная диагонализация, DPC, QuaDRiGa

Для цитирования: Землянухин С. Ю. Сравнительный анализ линейных алгоритмов прекодирования в низкоорбитальных спутниковых системах // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 181–183.

S. Yu. Zemlyanuhin

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
Tomsk, Russian Federation

COMPARATIVE ANALYSIS OF LINEAR PRECODING ALGORITHMS IN LOW EARTH ORBIT SATELLITE SYSTEMS

Abstract. This paper investigates the effectiveness of linear precoding algorithms for suppressing inter-user interference in a low Earth orbit satellite system with multi-user MIMO technology. A comparative analysis of Block Diagonalization Zero Forcing (BDZF) and Dirty Paper Coding (DPC) algorithms is conducted for a realistic communication channel model. The superiority of DPC over BDZF is up to 30 dB in terms of bit energy to noise power spectral density ratio at equal bit error probability values.

Keywords: satellite communications, MU-MIMO, inter-user interference, block diagonalization, DPC, QuaDRiGa.

For citation: Zemlyanuhin S. Yu. Comparative analysis of linear precoding algorithms in low Earth orbit satellite systems // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 181–183.

В рамках развития сетей 5G и 6G предусматривается интеграция компонентов не наземных сетей связи (NTN), в частности низкоорбитальных спутниковых сетей, что приведет к значительному повышению стабильности сети, увеличению зоны покрытия и объединению удаленных районов в единую высокоскоростную сеть. При этом использование множественного доступа с пространственным разделением (SDMA) в сочетании со схемой полного повторного использования частот приводит к значительным межпользовательским помехам.

Одной из важных проблем систем с многопользовательской технологией MIMO является подавление межпользовательских помех. Эта проблема особенно актуальна для

низкоорбитальных спутниковых сетей из-за малого пространственного разнесения и высокой пространственной корреляции каналов связи.

Целью исследования является сравнительный анализ эффективности алгоритмов подавления межпользовательских помех Block Diagonalization Zero Forcing (BDZF) и Dirty Paper Coding (DPC) для низкоорбитальной системы спутниковой связи с многопользовательской технологией MIMO.

В рамках исследования было проведено моделирование. Рассматриваемая модель состоит из низкоорбитального спутника с равномерной линейной антенной решеткой из восьми элементов и двух абонентских станций с линейными антенными решетками, состоящими из четырех элементов. В каждом временном интервале каждое устройство в сети использует один частотный и временной ресурс для приема сигнала от спутника.

Основные параметры модели: сценарий распространения: NTN город, прямая видимость; частотный диапазон: Ku; мощность передатчика спутника: 46 дБм; абонентские станции: широкополосный терминал (wideband, полоса 100 МГц, 4096 поднесущих OFDM) и терминал интернета вещей (IoT, полоса 500 кГц, 128 поднесущих OFDM).

В рамках модели для передачи было сгенерировано по 40 OFDM символов для абонентской станции интернета вещей и широкополосного терминала. Смоделировано 319 позиций спутника на орбите. Канальные матрицы генерировались с использованием стохастического генератора каналов QuaDRiGa.

Получены зависимости коэффициента битовых ошибок (BER) для каждого алгоритма прекодирования от положения спутника в азимутальных и угломестных координатах. Также получена зависимость коэффициента битовых ошибок от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума с учетом влияния смоделированных характеристик канала.

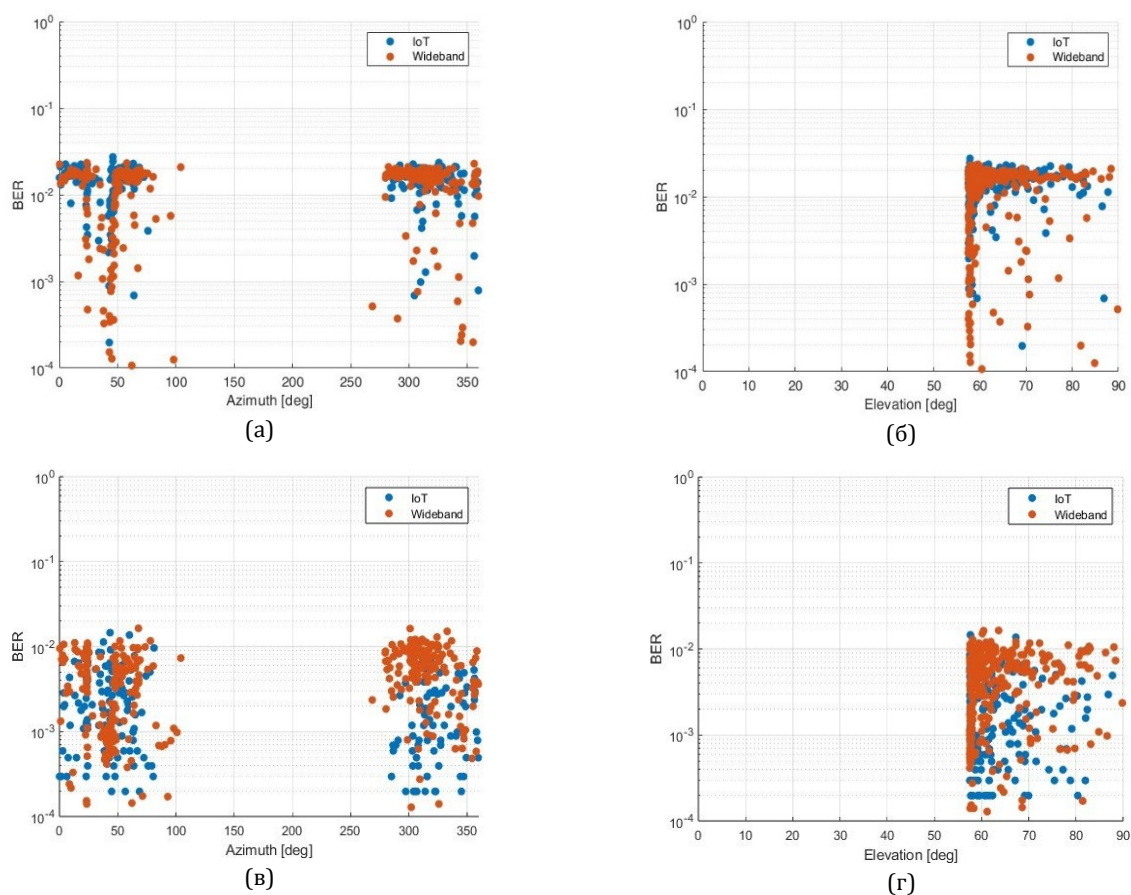


Рис. 1. Зависимость BER от азимута КА: BDZF (а), DPC (б); от угла места КА: BDZF (в), DPC (г)

На рис. 1 показаны зависимости коэффициента битовых ошибок от азимутального и угломестного положения спутника для обоих исследуемых методов. Из рисунка видно, что метод DPC обеспечивает более низкий коэффициент битовых ошибок во всем диапазоне углов.

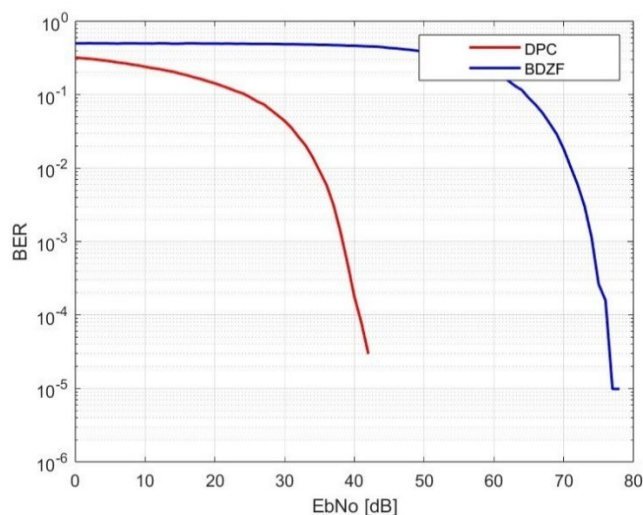


Рис. 2. Зависимость коэффициента битовых ошибок от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума.

На рис. 2 показана зависимость коэффициента битовых ошибок от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума. График демонстрирует, что выигрыш алгоритма DPC над алгоритмом Block Diagonalization Zero Forcing превышает 30 дБ для одинаковых значений коэффициента битовых ошибок в полученной модели канала спутника.

Столь значительное различие в 30 дБ обусловлено высокой пространственной корреляцией между антеннами в каждом из абонентских терминалов из-за наличия постоянной составляющей прямой видимости между абонентскими терминалами и низкоорбитальным спутником. В алгоритме Block Diagonalization Zero Forcing постобработка на абонентском терминале выполняется с использованием алгоритма Zero Forcing на основе вычисления псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза. При высокой пространственной корреляции между антеннами алгоритм имеет плохую обусловленность.

Проведенное исследование показало существенное превосходство метода Dirty Paper Coding над методом Block Diagonalization Zero Forcing в условиях высокой пространственной корреляции каналов низкоорбитальных спутниковых систем связи. Выигрыш по отношению сигнал/шум составляет свыше 30 дБ при одинаковых значениях вероятности битовой ошибки.

Метод Block Diagonalization Zero Forcing уступает по эффективности методу DPC, но имеет меньшую вычислительную сложность (линейный метод). Метод DPC, по сравнению с методом Block Diagonalization Zero Forcing, более эффективен в устранении межпользовательских помех, но имеет более высокую вычислительную сложность (нелинейный итерационный алгоритм).

К. А. Коронов¹, Д. Ю. Пономарёв¹, А. В. Фарафонов², М. М. Молоков¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация

²Военный институт (научно-исследовательский) ВКА имени А.Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Российская Федерация

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСПУТНИКОВОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКОЙ

Аннотация. Рассматривается методология интеллектуального управления многоспутниковыми группировками для решения задач поддержания орбитальной структуры, рационального распределения ресурсов, избежания столкновений, использующая принципы самоорганизации на основе мультиагентных систем и машинного обучения. Анализируются архитектуры, алгоритмы и реальные реализации таких систем, а также ключевые технические и правовые проблемы реализации автономного управления при решении технологических задач функционирования орбитальных группировок.

Ключевые слова: многоспутниковая группировка, интеллектуальная система управления, машинное обучение, мультиагентные технологии, космические аппараты.

Для цитирования: Коронов К. А., Пономарёв Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М. Интеллектуальная система управления многоспутниковой орбитальной группировкой // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 184–186.

K. A. Koronov¹, D. Yu. Ponomarev¹, A. V. Farafonov², M. M. Molokov¹

¹ERA Military Innovation Technopolis, Anapa, Russian Federation

²Military (Scientific-Research) Institute of Mozhaisky Military Aerospace Academy
Saint Petersburg, Russian Federation

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM FOR A MULTI-SATELLITE ORBITAL CONSTELLATION

Abstract. This paper examines the methodology of intelligent management of multi-satellite groupings, in order to solve the problems of maintaining the orbital structure, rational allocation of resources, and collision avoidance, using the principles of self-organization based on multi-agent systems and machine learning. The authors analyze the architectures, algorithms, and real-world implementations of such systems, as well as key technical and legal problems of implementing autonomous management in solving technological problems of the functioning of orbital constellations.

Keywords: multi-satellite constellation, intelligent control system, machine learning, multi-agent technologies, spacecraft.

For citation: Koronov K. A., Ponomarev D. Yu., Farafonov A. V., Molokov M. M. Intelligent control system for a multi-satellite orbital constellation // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 184–186.

Введение

С ростом числа спутниковых группировок традиционные методы управления, основанные на ручном вмешательстве, теряют эффективность. Современные орбитальные системы из десятков и сотен аппаратов требуют перехода к интеллектуальным системам на базе искусственного интеллекта и машинного обучения. Данные системы

обеспечивают автономное принятие решений, адаптацию к изменениям и координацию в реальном времени. Важны многоуровневая архитектура и совместимость с существующей инфраструктурой, что повышает эффективность, отказоустойчивость и конкурентоспособность космических систем.

Основные задачи интеллектуального управления

Управление орбитальной группировкой – многомерный процесс, включающий множество взаимосвязанных задач:

Поддержание баллистической структуры. Спутники должны сохранять заданное относительное положение для решения задач ДЗЗ, связи и др. Под действием возмущений параметры орбит изменяются. Система должна распределять задачи коррекции с учётом технического состояния и функциональных задач КА.

Распределение ресурсов. Каждый КА ограничен в памяти, вычислительной мощности, энергии и пропускной способности. Система должна эффективно распределять ресурсы как внутри КА, так и между ними, учитывая текущую и прогнозируемую нагрузку.

Обеспечение безопасности и избежание столкновений. В условиях насыщенности околоземного пространства система должна прогнозировать движение КА и опасных объектов, используя каталоги или бортовые средства. При угрозе – рассчитывать оптимальную манёвренную стратегию с минимизацией затрат топлива.

Самоорганизация и адаптация. При выходе из строя одного или нескольких КА система должна перераспределить их функции между оставшимися, используя дополнительные возможности и алгоритмы принятия решений. Такая система ведёт себя подобно биологическим колониям.

Вспомогательные элементы для реализации интеллектуального управления

Машинное обучение. Применяется для анализа больших объёмов данных, поступающих с бортовых датчиков. Нейронные сети могут распознавать аномалии в работе систем, прогнозировать отказы оборудования, классифицировать объекты на снимках Земли или в околоземном пространстве.

Межспутниковые каналы связи. Без надёжного обмена информацией между аппаратами невозможно построить коллективный интеллект. Современные орбитальные группировки используют лазерные каналы связи, обеспечивающие высокую скорость передачи данных и низкую вероятность перехвата.

Для принятия решений используется концепция «многоагентных систем», где каждый спутник рассматривается как агент с определёнными целями и возможностями. Агенты взаимодействуют, договариваются о действиях, конкурируют за ресурсы или сотрудничают для достижения общей цели.

Архитектура интеллектуальной системы

Типичная интеллектуальная система управления включает несколько уровней. На самом нижнем – бортовые подсистемы: навигация, ориентация, двигательная установка, связь, системы энергоснабжения. Они обеспечивают выполнение задач мониторинга технического состояния и исполнительную реализацию управляющих воздействий.

Средний уровень – координация в орбитальной группировке. Функциональная система представляет собой распределённую сеть на узлах баллистической структуры (КА). Спутники обмениваются информацией о состоянии и выполнении задач, а также принимают решения о коллективных действиях.

Верхний уровень – стратегическое управление. Он может быть частично реализован на Земле, но всё больше функций переносится на борт. Здесь определяются долгосрочные цели, приоритеты задач, стратегии развития группировки.

Архитектурные принципы интеллектуальных систем управления

Современные системы управления строятся на основе гибридной архитектуры, которая включает три взаимосвязанных компонента: орбитальный сегмент, наземный сегмент и коммуникационную инфраструктуру.

Орбитальный сегмент представляет собой совокупность спутников, оснащенных бортовыми вычислительными модулями с поддержкой искусственного интеллекта.

Наземный сегмент интеллектуальных систем управления перешел от пассивного мониторинга к активному взаимодействию с орбитальной группировкой, активно используя технологии цифровых двойников. Цифровой двойник – это виртуальная копия физической группировки, синхронизированная с реальными данными в реальном времени.

Коммуникационная инфраструктура интеллектуальных систем управления включает как межспутниковые линии связи, так и гетерогенные наземные сети.

Особенностью современных архитектур является их способность к самоорганизации. В отличие от жестких иерархий прошлых поколений, интеллектуальные системы управления сегодня могут перераспределять функции управления.

Алгоритмические основы интеллектуального управления

Ядро интеллектуальной системы – алгоритмы прогнозирования, оптимизации, распределения ресурсов и обработки данных.

Прогнозирование столкновений. Требуется данных от радаров, телескопов, бортовых сенсоров. Гибридные подходы (физические модели + глубокое обучение, например, LSTM) повышают точность прогнозов до 95% за 72 часа.

Оптимизация баллистической структуры. Многокритериальная задача. В проекте NASA TBIRD использованы методы теории игр: каждый КА минимизирует расход топлива, система достигает глобального оптимума. Эффективно для группировок из 1000+ спутников.

Обработка данных. Бортовые нейросети (например, CNN в Phi-Sat-2 ЕКА) фильтруют шумы, выделяют объекты, отбраковывают облачные снимки. Это снижает объем передачи на 30–70%.

Распределенное принятие решений. Алгоритмы обучения с подкреплением (например, MADDPG) позволяют спутникам обучаться локально, формировать конфигурации на 40% быстрее и адаптироваться без вмешательства с Земли.

Заключение

Интеллектуальные системы управления многоспутниковыми группировками решают задачи поддержания орбитальной структуры, распределения ресурсов, безопасности и самоорганизации. Эффективность достигается за счёт интеграции машинного обучения, мультиагентных архитектур и межспутниковых связей. Многоуровневая система повышает отказоустойчивость, снижает нагрузку на наземные средства и позволяет быстро адаптироваться к изменениям. Такие технологии формируют основу для масштабных автономных космических систем будущего.

Д. А. Мягких¹, Д. Ю. Пономарёв¹, А. В. Фарафонов², М. М. Молоков¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация

²Военный институт (научно-исследовательский) ВКА имени А.Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Российская Федерация

РАДИОФОТОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Аннотация. Рассмотрены ключевые моменты технологии радиофотоники, приведены её преимущества в сравнении с традиционными методами передачи данных, определены перспективы применения радиофотонных технологий в космических аппаратах.

Ключевые слова: радиофотоника, космические аппараты, радиотехника, передача информации.

Для цитирования: Мягких Д. А., Пономарёв Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М. Радиофотонные технологии в космических аппаратах // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 187–190.

D. A. Myagkikh, D. Y. Ponomarev¹, A. V. Farafonov², M. M. Molokov¹

¹ERA Military Innovation Technopolis, Anapa, Russian Federation

²Military (Scientific-Research) Institute of Mozhaisky Military Aerospace Academy
Saint-Petersburg, Russian Federation

RADIOPHOTONIC TECHNOLOGIES IN SPACECRAFT

Abstract. The article discusses the key points of radiophotonic technology, shows its advantages in comparison with traditional methods of data transmission, and defines the prospects for the use of radiophotonic technologies in spacecraft.

Keywords: radiophotonics, spacecraft, radio engineering, information transmission.

For citation: Myagkikh D. A., Ponomarev D. Y., Farafonov A. V., Molokov M. M. Radiophotonic technologies in spacecraft // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 187–190.

Введение

Опыт освоения космического пространства, практика разработки и эксплуатации космических средств предъявляет жесткие требования к массогабаритным характеристикам разрабатываемой бортовой обеспечивающей и специальной аппаратуры (БОА) и (БСА) космических аппаратов (КА). Воздействие неблагоприятные факторов космического пространства существенно ограничивает возможности применения традиционных технологий передачи и обработки сигналов, особенно в диапазоне сверхвысоких частот и крайне высоких частот и приводит к значительным потерям мощности вследствие диэлектрических потерь в проводниках, а также искажениям сигнала вследствие воздействия электромагнитных помех. Таким образом, актуальным становится поиск альтернативных решений и методов передачи служебной и целевой информации. Одним из перспективных направлений решения указанных проблем является применение для информационного обмена методов и средств радиофотоники.

Радиофотоника – междисциплинарная область, объединяющая достижения радиотехники и фотоники. Передача сигналов по оптоволокну предоставляет ряд значительных преимуществ, таких как:

- минимизацию потерь энергии и общее уменьшение энергопотребления при решении задач информационного обмена;
 - исключение влияния электромагнитных полей;
 - снижение массы кабельной сети;
 - повышение пропускной способности.
- Оптические системы передачи информации не подвержены наводкам, а также характеризуются низким энергопотреблением по сравнению с традиционными радиочастотными линиями.

Современные исследования в области радиофотоники демонстрируют активный прогресс при разработке элементов и устройств передачи информации с ее использованием как за рубежом, так и в России.

Целью данной работы является анализ потенциала радиофотоники для применения в системах передачи сигналов на борту космических аппаратов.

Физические основы радиофотоники

Радиофотоника – междисциплинарная технология, находящаяся на стыке радиотехники и фотоники. Она основана на взаимодействии электромагнитных волн в радиочастотном и оптическом диапазонах. В основе технологии лежит принцип модуляции радиосигнала на оптическую несущую волну, последующей передаче через волоконно-оптическую линию связи и дальнейшей демодуляции для восстановления оригинального радиосигнала. Этот процесс осуществляется с использованием специализированных устройств, таких как модуляторы, фотодетекторы и лазеры.

Основные этапы информационного обмена посредством методов и средств радиофотоники.

- Для передачи данных используется лазерный источник, который генерирует устойчивый оптический сигнал с высокой частотой несущей. Такой сигнал обладает низкими потерями при распространении по оптоволокну и минимальной подверженностью внешним воздействиям.

- Радиочастотный сигнал модулируется на оптической несущей с помощью электрооптических модуляторов. В зависимости от требований к системе могут использоваться различные виды модуляции: амплитудная, фазовая или частотная.

- Модулированный оптический сигнал передается по оптоволоконному тракту. Оптоволокну обеспечивает крайне низкие потери (порядка 0,2 дБ/км для современных волокон) и высокую пропускную способность, что делает его идеальным выбором для передачи данных между элементами бортовой аппаратуры КА.

- На приемной стороне оптический сигнал преобразуется обратно в радиочастотный диапазон с помощью фотодетекторов. Фотодетекторы преобразуют оптическую мощность в электрический сигнал, сохраняя исходные характеристики радиочастотного сигнала.

- После демодуляции сигнал может быть дополнительно обработан с использованием традиционных радиочастотных методов. Это позволяет интегрировать радиофотонные технологии в существующие системы связи без необходимости полной замены оборудования.

Радиофотоника предлагает решение традиционных проблем информационного обмена, таких как низкая пропускная способность, высокая чувствительность к электромагнитным воздействиям и прочим, заменяя электрические соединения оптическими. Вместо передачи радиочастотного сигнала по коаксиальному кабелю он модулируется на оптическом носителе и передается по оптоволокну. Это позволяет: снизить потери до 0,2 дБ/км (против 10 дБ/м у коаксиала), устранить влияние ЭМП и передавать сиг-

налы с полосой до сотен ГГц, физически разделить блоки антенн и электронные компоненты без потерь качества информационного обмена.

Таким образом, применение методов и средств радиофотоники трансформирует и дополняет существующие радиотехнические комплексы, перенося часть реализуемых функций информационного обмена из электронного в оптический домен. Такой подход позволяет существенно улучшить характеристики бортовых радиоэлектронных систем, и является важным фактором при разработке, проектировании и эксплуатации космических систем, оптимизируя такие важные характеристики БОА и БСА как надёжность, масса и производительность.

Основные этапы передачи информационного сигнала методами и средствами радиофотоники:

- электрооптическое (Е/О) преобразование;
- передача сигнала по оптоволоконному каналу связи;
- оптоэлектронное преобразование.

Несмотря на значительные преимущества радиофотонных систем их применение в космических условиях сопряжено с рядом существенных технических и физических ограничений. Эти вызовы обусловлены как спецификой космической среды, так и особенностями функционирования фотонных компонентов при экстремальных нагрузках. основными проблемами применения радиофотонных технологий являются:

- нелинейность электрооптического преобразования, возникающая в модуляторах при высоких уровнях мощности радиосигнала;
- уровень шумов в оптоэлектронных компонентах;
- температурная нестабильность также оказывает существенное влияние на работу радиофотонных систем;
- радиационная деградация оптических волокон и полупроводниковых компонентов;
- высокая сложность интеграции и стоимость производства радиофотонных компонентов.

Заключение

Радиофотоника представляет собой перспективное направление развития бортовых систем космических аппаратов, способное преодолеть ограничения традиционных радиочастотных технологий и существенно повысить как качество информационного обмена, так и основные характеристика самих КА и их бортовых систем. Благодаря использованию оптоволоконных линий связи, радиофотонные системы обеспечивают низкие потери сигнала, высокую помехоустойчивость, значительное снижение массы и габаритов бортовой кабельной сети, а также возможность передачи сигналов с полосой пропускания, достигающей сотен гигагерц.

Несмотря на существующие проблемы, связанные с нелинейностью компонентов, температурной нестабильностью, радиационной деградацией и сложностью интеграции, активное развитие материаловедения, фотонных интегральных схем и методов компенсации искажений позволяет поэтапно решать эти проблемы.

Внедрение радиофотонных технологий в процессы информационного обмена открывает новые возможности для создания высокоскоростных, надёжных и масштабируемых систем связи и обработки сигналов, что особенно актуально для разработки и создания перспективных образцов космической техники, позволяя создавать КА и их орбитальные группировки со значительно улучшенными характеристиками по скорости передачи, организации и надёжности информационного обмена.

Таким образом, применение радиопотонных технологий в бортовых информационных системах космических аппаратов позволяет значительно улучшить характеристики бортовой аппаратуры перспективных образцов космической техники, а использование методов и принципов радиопотоники при разработке и создании бортовой аппаратуры современных КА – не просто замена традиционных кабельных коммуникаций, а фундаментальное изменение архитектуры бортовой радиочастотной системы, обеспечивающее высокую надёжность, производительность и масштабируемость систем информационного обмена.

А. В. Николаев¹, И. Н. Солодков¹, Д. А. Сазанов¹, И. С. Ходак²

¹Академия ФСО России, Орел, Российская Федерация

²ФСО России, Москва, Российская Федерация

ПРОГРАММНЫЙ СИМУЛЯТОР НИСХОДЯЩЕГО КАНАЛА Ku-ДИАПАЗОНА СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ STARLINK

Аннотация. Представлен программный симулятор нисходящего канала Ku-диапазона системы Starlink. Цель работы – создание доступного инструмента для моделирования структуры сигнала без дорогостоящего оборудования. Учитываются эффекты Доплера и шумовая обстановка. Показана возможность надёжного обнаружения кадров при SNR до –15,7 дБ. Симулятор открывает перспективы применения сигналов спутниковых систем связи для задач позиционирования, навигации и синхронизации времени.

Ключевые слова: Starlink, Ku-диапазон, нисходящий канал, симулятор, OFDM.

Для цитирования: Николаев А. В., Солодков И. Н., Сазанов Д. А., Ходак И. С. Программный симулятор нисходящего канала Ku-диапазона системы спутниковой связи Starlink // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 191–193.

A. V. Nikolaev¹, I. N. Solodkov¹, D. A. Sazanov¹, I. S. Khodak²

¹The Academy of the Federal Guard Service of the Russian Federation, Orel, Russian Federation

²Federal Guard Service of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

SOFTWARE SIMULATOR OF THE STARLINK KU-BAND DOWNLINK CHANNEL

Abstract. The paper presents a software simulator of the Starlink Ku-band downlink channel. The purpose of the work is to create an accessible tool for signal structure modeling without expensive equipment. Doppler effects and noise conditions are taken into account. Reliable frame detection is demonstrated at SNR levels down to –15.7 dB. The simulator opens up prospects for using communication satellite signals for positioning, navigation, and timing applications.

Keywords: Starlink, Ku-band, downlink channel, simulator, OFDM.

For citation: Nikolaev A. V., Solodkov I. N., Sazanov D. A., Khodak I. S. Software simulator of the Starlink Ku-band downlink channel // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 191–193.

Системы спутниковой связи (ССС) на низкой околоземной орбите (НОО), такие как Starlink, One Web, Iridium и Orbcomm, представляют собой перспективную платформу для альтернативных решений задач позиционирования, навигации и синхронизации времени. Основное предназначение СССР – предоставление телекоммуникационных услуг, но интенсивное наращивание количества космических аппаратов на низкой околоземной орбите позволяет их использовать в качестве альтернативы традиционным системам глобального позиционирования.

Ряд предыдущих исследований показал, что использование всего 1,32% пропускной способности нисходящего канала системы может обеспечить точность позиционирования, превосходящую GPS, особенно в условиях прямой видимости. Эти результаты подчеркивают потенциал сигналов Starlink для применения в системах позиционирования, навигации и синхронизации времени. Однако прямой захват и анализ широкополосного сигнала Starlink требует дорогостоящего оборудования, способного обрабаты-

вать полосы шириной до 250 МГц. В работе представлен программный симулятор нисходящего канала Ku-диапазона CCC Starlink, позволяющий генерировать сигналы нисходящей линии без необходимости в дорогостоящем оборудовании. Таким образом открывается возможность проводить исследования структуры сигнала, его обнаружения, синхронизации и применения как в задачах позиционирования, навигации и синхронизации времени, так и в задачах связи.

Нисходящий канал Ku-диапазон CCC Starlink разделен на 8 подканалов по 250 МГц. В каждом подканале используется OFDM – модуляция с 1024 поднесущими и QAM-модуляцией (в основном 4-QAM и 16-QAM). Кадр состоит из 302 символов, каждый длительностью 4,4 мкс, включая циклический префикс и защитный интервал.

Ключевыми синхросимволами являются: PSS (Primary Synchronization Sequence) – первый символ кадра с уникальной временной структурой; SSS (Secondary Synchronization Sequence) – второй символ, используемый для дальнейшей синхронизации.

Для реалистичного моделирования сигнала используется общедоступная эфемеридная информация от SpaceX и NORAD. Это позволяет точно моделировать относительную скорость спутника и приемника, а значит – корректно рассчитывать эффект Доплера. Он моделируется как изменение фазы сигнала во времени, интегрированного по всему кадру, с последующим применением к сформированному сигналу. Это особенно важно для задач точного определения времени прихода, необходимых в задачах позиционирования, навигации и синхронизации времени. Реализованная схема учитывает основные физические и протокольные негативные эффекты и может быть расширена на мультиканальную обработку. Алгоритм реализован в среде имитационного моделирования Matlab.

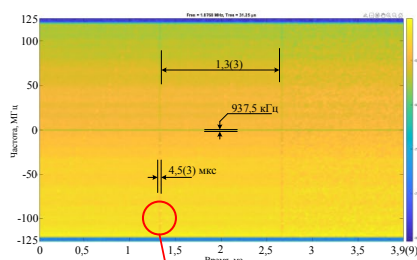


Рисунок 1.1 – Частотно-временное представление сигнала Starlink

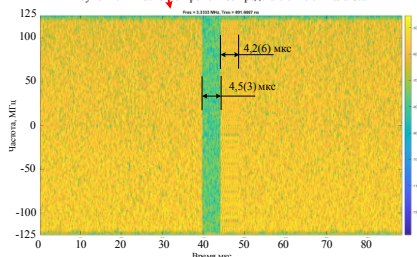


Рисунок 1.2 – Частотно-временное представление сигнала Starlink

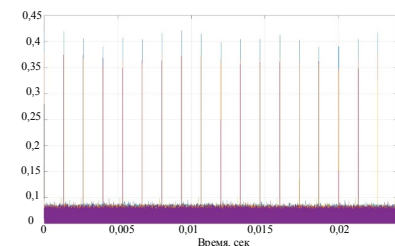


Рисунок 1.3 – Корреляционный анализ структуры кадров сигнала Starlink

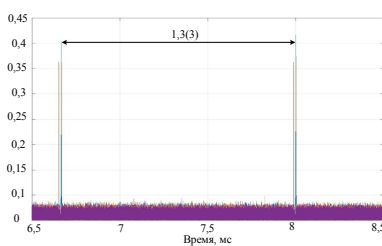


Рисунок 1.4 – Определение длительности кадра CCC Starlink

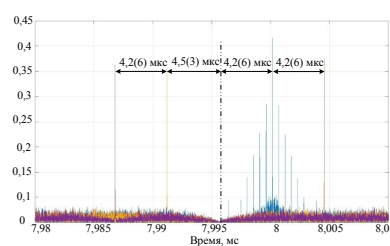


Рисунок 1.5 – Корреляционный анализ PSS, SSS, CSS, CM1SS, определение их длительности

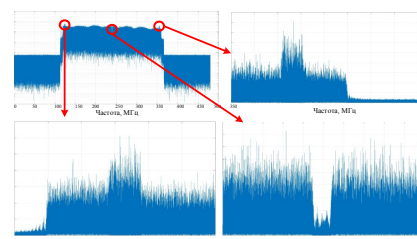


Рисунок 1.7 – Пилотные несущие и неиспользуемые несущие частоты (511 - 514)

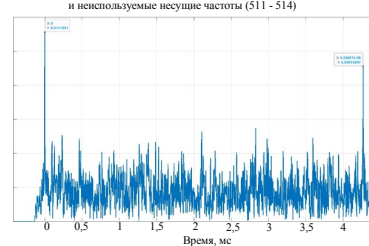


Рисунок 1.8 – Корреляционный анализ длины циклического префикса

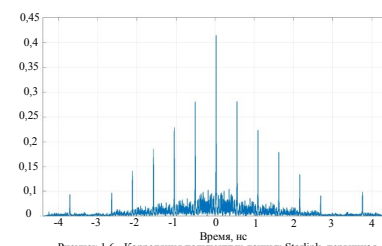


Рисунок 1.6 – Корреляция полученных данных Starlink, первичная последовательность синхронизации после доплеровской компенсации

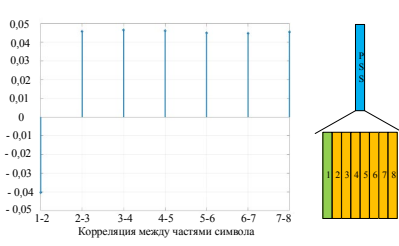


Рисунок 1.9 – Анализ структуры первичной последовательности синхронизации (PSS)

Частотно-временная структура нисходящего канала Ku-диапазона CCC Starlink

Для обнаружения сигнала используется гипотеза Неймана-Пирсона, построенная на вычислении комплексной функции неоднозначности между принятым сигналом и локальной копией синхросимволов. Вычисляется двумерная карта, на которой максимумы соответствуют времени и частоте прихода.

В работе рассматриваются три статистические гипотезы: H_0 – шум (кадр отсутствует), H_1 – частичное совпадение (сдвинутый кадр), H_2 – точное совпадение (обнаружен кадр).

Для каждой из гипотез рассчитано распределение статистики (хи-квадрат, гамма, нецентральное хи-квадрат). Это позволяет: установить порог с заданной вероятностью ложной тревоги; оценить вероятность обнаружения в зависимости от SNR; восстановить pre-correlation SNR по статистике пика.

Результаты: при использовании только PSS кадры могут быть надежно обнаружены при SNR = -15,7 дБ. С увеличением количества известных символов или при накоплении нескольких кадров чувствительность возрастает.

Программный симулятор протестирован как на синтетических данных, так и на реальных записях сигналов Starlink (см. рис.). Программный симулятор нисходящего канала Ku-диапазона CCC Starlink, способен генерировать сигнал с высокой реалистичностью. Он учитывает известную на данный момент структуру кадра, фазовые и частотные искажения, а также шумовую обстановку.

Основные достоинства: доступность, т.е. не требует дорогостоящего оборудования; гибкость – параметризуем по частоте, влиянию эффекта Доплера, виду шуму, структуре кадра; применимость как для связи, так и для навигации; верифицирован – показана работоспособность на реальных данных.

Программный симулятор открывает новые возможности для разработки и тестирования навигационных алгоритмов на базе сигналов спутников связи.

Д. В. Новожилов¹, Д. Ю. Пономарёв¹, А. В. Фарафонов², М. М. Молоков¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация

²Военный институт (научно-исследовательский) ВКА имени А.Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Российская Федерация

СОВРЕМЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Аннотация. Рассмотрены современные алгоритмы обработки телеметрии малых космических аппаратов: потоковая кластеризация и глубокое обучение. Они обеспечивают эффективное распознавание состояний аппарата, выявление неисправностей и прогнозирование показателей. Описаны преимущества и перспективы применения этих методов.

Ключевые слова: малые космические аппараты, телеметрия, потоковая обработка, нейронные сети, кластеризация, сбор данных, обработка данных.

Для цитирования: Новожилов Д. В., Пономарёв Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М. Современные алгоритмы обработки телеметрических данных малых космических аппаратов // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 194–196.

D. V. Novozhilov¹, D. Y. Ponomarev¹, A. V. Farafonov², M. M. Molokov¹

¹ERA Military Innovation Technopolis, Anapa, Russian Federation

²Military (Scientific-Research) Institute of Mozhaisky Military Aerospace Academy
Saint-Petersburg, Russian Federation

MODERN ALGORITHMS FOR PROCESSING TELEMETRY DATA OF SMALL SPACECRAFT

Abstract. This article discusses modern algorithms for processing telemetry of small spacecraft: streaming clustering and deep learning. They provide effective recognition of the device's conditions, troubleshooting, and predicting performance. The advantages and prospects of using these methods are described.

Keywords: small spacecraft, telemetry, streaming, neural networks, clustering, data collection, data processing.

For citation: Novozhilov D. V., Ponomarev D. Y., Farafonov A. V., Molokov M. M. Modern algorithms for processing telemetry data of small spacecraft // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 194–196.

Введение

Современная космическая отрасль активно развивается благодаря интенсивному использованию малых космических аппаратов, ставших ключевым элементом в научных исследованиях, дистанционном зондировании Земли и обеспечении глобальных коммуникаций. Несмотря на небольшие габариты и ограниченность ресурсов, эти устройства играют важную роль во многих областях космической индустрии. Однако эффективное управление ими невозможно без постоянного контроля и тщательного анализа больших объемов телеметрической информации, поступающей практически мгновенно.

Данная статья посвящена современным алгоритмам обработки потоков телеметрических данных применительно к малым космическим аппаратам. Основное внимание уделено таким перспективным технологиям, как потоковая кластеризация и глубокое обучение, продемонстрировавшим свою высокую производительность в решении широкого спектра аналитических задач – от классификации состояния устройств до автоматического обнаружения отклонений и предсказания технического состояния. Помимо теоретического рассмотрения указанных методик, подробно освещаются практическая реализация предложенных решений и их положительное воздействие на общую эффективность эксплуатации малых космических аппаратов.

Алгоритмы потоковой кластеризации

Потоковая кластеризация – это эффективный метод анализа данных, предназначенный для быстрой обработки огромных объемов информации, поступающих в виде непрерывного потока. Ключевая особенность метода заключается в том, что он позволяет формировать группы похожих объектов («кластеров») практически мгновенно, не сохраняя весь набор исходных данных целиком.

Среди ключевых особенностей потоковой кластеризации выделяются:

- обработка данных в реальном времени,
- адаптация к динамике данных,
- энергоэффективность.

Различные алгоритмы потоковой кластеризации имеют свои особенности и область применения:

- CluStream сохраняет промежуточные результаты, что обеспечивает высокую скорость обработки и эффективное использование памяти, хотя настройка параметров может оказаться сложной.

- ClusTree обладает иерархическим подходом, предоставляя гибкость и хорошую масштабируемость, но предъявляет повышенные требования к ресурсам.

- DenStream основан на плотности точек, что повышает точность кластеризации и обработку шума, однако чувствителен к выбору параметров.

- DStream ориентирован на масштабируемость и обработку больших объемов данных, хотя его реализация технически сложнее.

- DBSTREAM реализует базу данных-подход, гарантирующий надежность и качественное управление данными, но увеличивает сложность самой системы.

Выбор конкретного алгоритма для малого космического аппарата должен учитывать не только характеристики данных, но и ограничения бортовой платформы, такие как объём памяти, вычислительная мощность и энергопотребление.

Нейросетевые алгоритмы

Современные технологии телеметрии малых космических аппаратов активно внедряют методы глубокого обучения для повышения точности обработки данных и автоматизации процесса принятия решений. Основные типы нейросетевых алгоритмов, успешно применяемых в телеметрии:

1. Многослойные перцептроны – это классические нейронные сети, содержащие входной слой, один или несколько скрытых слоев и выходной слой. Узлы каждого скрытого слоя связаны со всеми узлами соседних слоев. MLP хорошо работают с небольшими наборами данных и выполняют базовые классификации состояний аппарата. Однако их низкая эффективность при обработке временных рядов и сложных паттернов ограничивает область применения.

2. Свёрточные нейронные сети предназначены для анализа многомерных сигналов, таких как временные ряды телеметрии. Архитектура включает слои свертки, pooling и полносвязные слои. Одномерные свертки (1D-CNN) повышают эффективность распознавания временных закономерностей.

3. Рекуррентные нейронные сети отлично справляются с анализом последовательных данных, учитывают зависимость от предыдущих состояний и предоставляют точную оценку текущих состояний.

Преимущества применения нейросетевых алгоритмов в телеметрии на малых космических аппаратах заключаются в следующем:

- работа в реальном времени позволяет своевременно реагировать на изменения;
- автоматическое обнаружение сбоев и дефектов даже при неполных или зашумленных данных;
- прогнозирование работоспособности компонентов улучшает надежность и снижает риск аварий;
- высокая точность классификации поддерживает принятие надежных решений.

Заключение

В данной статье были рассмотрены два ключевых подхода к решению задач телеметрии на малых космических аппаратах: алгоритмы потоковой кластеризации и нейросетевые алгоритмы. Оба метода продемонстрировали свою значимость и перспективность в условиях ограниченных ресурсов. Дальнейшие исследования направлены на повышение устойчивости к шумовым помехам, сокращение энергозатрат и улучшение качества принимаемых решений. Интеграция этих подходов позволит создать высокоэффективные интеллектуальные системы поддержки принятия решений, обеспечивающие надежность и долговечность операций малых космических аппаратов.

Д. В. Новожилов¹, Д. Ю. Пономарёв¹, А. В. Фарафонов², М. М. Молоков¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация

²Военный институт (научно-исследовательский) ВКА имени А.Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Российская Федерация

ТЕЛЕМЕТРИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДАННЫМИ НА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Аннотация. Проведен обзор современного состояния телеметрии и систем управления данными на малых космических аппаратах. Рассмотрены актуальные технологии бортовой обработки, коммуникации и автономного принятия решений. Выделены тенденции развития – использование искусственного интеллекта, межспутниковых сетей и энергоэффективных компонентов.

Ключевые слова: малые космические аппараты, телеметрия, сбор данных, обработка данных, системы управления данными, пограничные вычисления, межспутниковые сети, автономия, искусственный интеллект.

Для цитирования: Новожилов Д. В., Пономарёв Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М. Телеметрия и управление данными на малых космических аппаратах // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 197–199.

D. V. Novozhilov¹, D. Y. Ponomarev¹, A. V. Farafonov², M. M. Molokov¹

¹ERA Military Innovation Technopolis, Anapa, Russian Federation

²Military (Scientific-Research) Institute of Mozhaisky Military Aerospace Academy
Saint-Petersburg, Russian Federation

TELEMETRY AND DATA MANAGEMENT ON SMALL SPACECRAFT

Abstract. This article provides an overview of the current state of telemetry and data management systems on small spacecraft. The paper considers current technologies of on-board processing, communication and autonomous decision-making, and highlights the development trends – the use of AI, inter-satellite networks and energy-efficient components.

Keywords: small spacecraft, telemetry, data collection, data processing, data management systems, edge computing, inter-satellite networks, autonomy, artificial intelligence.

For citation: Novozhilov D. V., Ponomarev D. Y., Farafonov A. V., Molokov M. M. Telemetry and data management on small spacecraft // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 197–199.

Введение

За последние годы малые космические аппараты превратились в важный инструмент для исследований в науке, мониторинге Земли и развитии коммуникационных технологий. Массовое производство и значительное снижение затрат на запуск сделали освоение космоса доступным университетам, стартап-компаниям и странам с развивающейся экономикой. Тем не менее, узость энергоресурсов, массы, объема и вычислительной мощности создает серьезные проблемы для эффективной организации процессов сбора, хранения и передачи данных. Одним из наиболее важных элементов каждого такого аппарата является телеметрия – непрерывно функционирующая система мониторинга состояния аппарата. В условиях ограниченности ресурсов малых КА эта система

должна обеспечивать надежность, энергосбережение, компактность и устойчивость к радиации. Данная работа представляет собой краткое изложение современных тенденций и подходов к построению телеметрических систем и управлению данными на борту малых космических аппаратов.

Система телеметрии на малых КА

Под телеметрией понимается процедура регистрации и последующей передачи сведений о состоянии космического аппарата на земную станцию. На малых космических аппаратах выделяют следующие основные категории источников данных:

- системы самого аппарата: электропитание, навигационная и управляющая инфраструктура, двигатели и прочие элементы;
- низкоинформативные научные инструменты: простейшие сенсоры, собирающие минимально значимую научную информацию;
- высокоинформативные научные приборы: телевизионные камеры, сканирующие устройства и другое оборудование, обеспечивающее сбор детальной и высокозначимой информации. Все перечисленные виды данных собираются единой системой сбора и накопления информации и отправляются на Землю через общий канал связи.

Сбор данных на борту малого КА

Процесс сбора телеметрической информации организован с помощью специализированных интерфейсов, связывающих разнообразные датчики и модули с главным контроллером аппарата. Из-за жестких ограничений по ресурсам питания и стойкости к радиационной среде малые космические аппараты оснащают специализированным оборудованием. Например, микроконтроллеры серии ARM Cortex-M, получившие широкое распространение среди разработчиков малых аппаратов, отличаются низким энергопотреблением и достаточным уровнем производительности для эффективного сбора и обработки значительных массивов данных.

Важнейшим аспектом функционирования телеметрической системы является организация хранения данных. Основные варианты памяти, доступные разработчикам малых КА, представлены двумя основными типами:

- радиационно-стойкая память FRAM/MRAM. Эта технология основана на применении ферроэлектрических и магниторезистивных материалов, обеспечивая повышенную защиту от воздействия радиоактивного излучения. Хотя ёмкость таких модулей относительно невелика (от сотен килобит до единиц мегабайт), они подходят для задач с умеренными требованиями к объему хранимой информации.
- коммерческая FLASH-память. Этот тип памяти отличается значительно большим объемом, однако страдает недостаточной защищенностью от влияния радиационного фона. Высокоскоростные частицы способны повреждать ячейки флеш-памяти, вызывая изменения данных, что ставит её эксплуатацию на орбите под сомнение.

Общая емкость доступной памяти на малом КА колеблется между несколькими сотнями мегабайт и десятками гигабайт, что накладывает существенные ограничения на объемы сохраняемой научной информации, особенно при работе с высокочувствительными устройствами наблюдения (телевизионные камеры высокого разрешения). Организация хранения реализуется двумя способами:

- использование файловой системы, адаптированной для условий с ограниченными ресурсами, например, LittleFS. Она обеспечивает стабильность и безопасность данных даже при сбоях в процессе чтения/записи;
- применение циклических буферов. Буферы используются для оперативной

фиксации новых данных с автоматической заменой устаревшей информацией. Подобный подход идеален при стабильном потоке новых данных и дефиците свободного места на носителе.

Чтобы повысить эффективность обмена данными между аппаратом и Землей, применяют ряд специальных методов:

- компрессия данных. Часто используются форматы, подобные JPEG2000 и алгоритмы LZ77/LZW, что позволяет снизить нагрузку на каналы связи.
- фильтрация и агрегация данных. Применяются процедуры удаления случайных помех (фильтры Гаусса, медианная фильтрация) и объединения показаний различных сенсоров для улучшения точности полученных результатов.
- прямой анализ данных на борту аппарата. Благодаря этому снижается необходимость передавать большие объемы необработанных данных на землю, позволяя экономить ресурсы связи.

Заключение

Сегодняшнее поколение малых КА демонстрирует эволюционный сдвиг от простого ретранслятора данных к интеллектуальному оборудованию, способному самостоятельно анализировать ситуацию и принимать важные решения. Новые технологические прорывы в сфере граничных вычислений, развитие оптических линий связи и создание межспутниковых сетей создают основу для появления автономных спутниковых группировок, готовых быстро реагировать на любые происшествия (например, стихийные бедствия). Ожидается дальнейшее расширение роли искусственного интеллекта, квантовых сенсоров и инноваций в области энергонезависимой памяти. Ограниченные ресурсы остаются серьезной проблемой, однако несмотря на трудности, малые космические аппараты продолжают совершенствоваться, становясь все более сложными и умными системами, в которых телеметрия и контроль данных играют ключевую роль.

Д. А. Новосельцев

ООО «Д-Старт», Омск, Российская Федерация

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ И МАНЕВРОВ БЮДЖЕТНЫХ СРЕДСТВ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ НА ПЛАТФОРМАХ СВЕРХМАЛЫХ КА

Аннотация. Предлагается использование интегрированных сублимационных двигателей циклической микротяги для обеспечения маневров и деорбитинга сверхмалых спутников, выполненных в виде панелей корпуса из композитных материалов. Этим обеспечивается скорейшее развертывание бюджетных группировок средств спутниковой связи различного назначения.

Ключевые слова: спутник, двигатель, микротяга, маневр, деорбитинг, углепластик, сублимация.

Для цитирования: Новосельцев Д. А. Технические решения обеспечения положения и маневров бюджетных средств спутниковой связи на платформах сверхмалых КА // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 200–202.

D. A. Novoseltsev

D-Start LLC, Omsk, Russian Federation

TECHNICAL SOLUTIONS FOR ENSURING THE POSITION AND MANEUVERS OF LOW-COST SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS ON ULTRA-SMALL SPACECRAFT PLATFORMS

Abstract. It is proposed to use integrated sublimation engines of cyclic micro-thrust to provide maneuvers and deorbiting of ultra-small satellites made in the form of body panels made of composite materials. This ensures the early deployment of low-cost groupings of satellite communications facilities for various purposes.

Keywords: satellite, engine, microload, maneuver, deorbiting, carbon fiber, sublimation.

For citation: Novoseltsev D. A. Technical solutions for ensuring the position and maneuvers of low-cost satellite communication systems on ultra-small spacecraft platforms // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 200–202.

Рассматривалась возможность создания систем оперативного обеспечения высокоширотной радиосвязи на базе роев простейших сверхмалых спутников – пассивных радиоотражателей фемто-класса (единичной массой до десятков граммов), разведение и удержание которых на заданной орбите и последующий деорбитинг осуществляются с помощью интегрированных тепловых (солнечных) твердотопливных ракетных двигателей микротяги, интегрированных в конструкцию. Концепция была представлена автором 22.10.2022 г. на 150-м заседании научного семинара «Современные проблемы радиофизики и радиотехники».

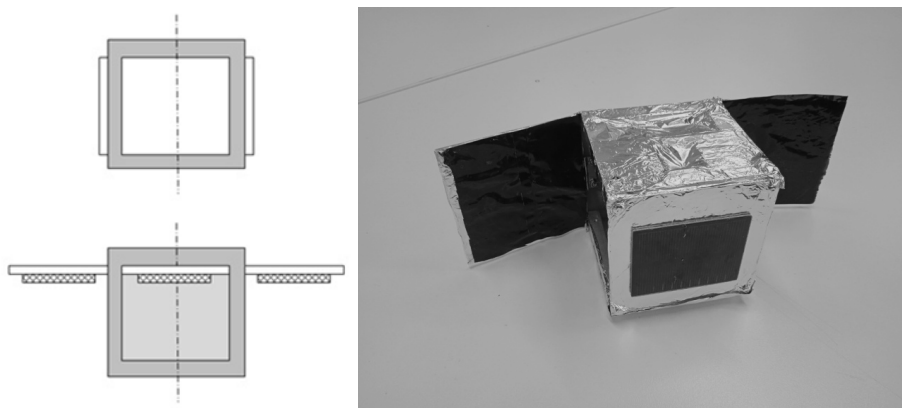
Современные технические решения предполагают использование активных спутников с традиционными средствами радиосвязи, но с учетом достигнутых решений в области миниатюризации элементной базы. Такие решения реализуются на базе спутников пико- и нано-класса (соответственно массой менее и более 1 кг). Примерами могут служить зарубежные спутники IoT, такие как SpaceBEE компании Swarm

Technologies, а также отечественные опытные спутники StratoSat-TK1 компании «Малые космические системы» и «Стратонавтика», запущенные с борта спутника-носителя в 2023 г. Один из спутников StratoSat-TK1 использовался в качестве экспериментального сервера компании RUVDS с обменом данными с Землей.

Одной из основных проблем использования подобных спутников является отсутствие возможности установки на борту любых современных космических двигателей. Это усложняет их массовое внедрение, т.к. не обеспечивается не только их штатный деорбитинг (для исключения накопления космического мусора), но и возможность их оперативного уклонения от столкновений с другими космическими аппаратами.

Для решения проблемы компанией «Д-Старт» также предлагается использование на подобных спутниках интегрированных тепловых (солнечных) термосублимационных двигателей циклической микротяги, выполненных в виде плоских панелей с внешней теплоизоляцией. В рабочем состоянии панели развернуты, и тяга двигателей обеспечивается истечением сублимируемых летучих компонентов, скорость истечения которых определяется как наиболее вероятная скорость движения молекул при данной температуре.

Для компактных спутников наиболее распространенных форм-факторов CubeSat, PocketQube, TinySat и аналогичных, предлагается использовать схему, в которой интегрированные двигатели в нерабочем (сложенном) состоянии выполняют функции боковых панелей корпуса, несущих или вспомогательных, также выполняющих функцию радиационной, микрометеоритной и тепловой защиты.



Пример компоновки спутника форм-фактора CubeSat 1U

Для обеспечения механических свойств, предлагается выполнять панели из современных композитных материалов с эпоксидным связующим, в т.ч. углепластиков, применяемых в аэрокосмической промышленности (ГОСТ 33369-2015).

По имеющимся данным, при термическом нагреве возможна сублимация до 75% массы панели из углепластика с эпоксидным связующим. В ходе экспериментов ООО «Д-Старт», проведенных в 2024 г. в термобарокамере с моделями двигателей из листа углепластика производства компании «М-Карбо» толщиной 2 мм, подтверждена скорость испарения около 0,02% в минуту при средней температуре 350 К. При этом при массе спутника типа StratoSat-TK1 в 0,1 кг и полном расходе материала панелей 0,01 кг изменение его характеристической скорости должно было составить около 40 м/с в течение 62,5 часов времени солнечного нагрева панелей спутника, или около 120 часов полета спутника с раскрытыми панелями на низкой околоземной орбите.

Для применения данного технического решения на специализированных спутниках радиосвязи также возможно использование композитных материалов с повышенными радиоотражающими или радиопоглощающими свойствами, а также радиопрозрачных материалов, в зависимости от состава и структуры наполнителя.

Для всех спутников аналогичных форм-факторов тяговооруженность и эффективность применения двигателей подобного типа будет снижаться с ростом геометрических размеров и массы, и на спутниках большей массы, чем CubeSat 1U, целесообразно использование других конструктивных решений, при сохранении общего принципа. Так, возможно использование нового форм-фактора TriSat компании «ОКБ Пятое Поколение» в виде раскладных плоскостей, или зарубежного форм-фактора DiskSat, со значительно большим отношением площади поверхности к массе.

Внедрение подобных технических решений обеспечит скорейшее развертывание бюджетных группировок средств спутниковой связи различного назначения на платформах сверхмалых спутников.

Малая инновационная компания «Д-Старт» планирует изготовить опытные образцы двигателей для проведения летных испытаний и провести макетирование спутников до конца 2025 г., готова к сотрудничеству с заинтересованными разработчиками средств спутниковой связи, в т.ч. в части проведения совместных испытаний и опытной эксплуатации.

М. И. Обертюк, В. К. Назарин, А. А. Сидякин

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПУТНИКОВЫХ МОДЕМОВ. НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация. Представлены актуальные проблемы разработки современных спутниковых модемов L-диапазона с применением отечественной элементно-компонентной базы. Предложены пути их решения в части существующей на рынке элементно-компонентной базы, современных режимов и протоколов работы.

Ключевые слова: спутниковый модем, отечественная элементно-компонентная база, топология сети, DVB-S.

Для цитирования: Обертюк М. И., Назарин В. К., Сидякин А. А. Анализ существующих спутниковых модемов. Направления развития отечественного оборудования // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 203–206.

M. I. Obertyuk, V. K. Nazarin, A. A. Sidyakin

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

ANALYSIS OF EXISTING SATELLITE MODEMS. DIRECTIONS FOR DEVELOPMENT OF DOMESTIC EQUIPMENT

Abstract. The paper presents the current problems of developing modern L-band satellite modems using a domestic element-component base (ECB) and ways of solving them in terms of existing ECB on the market, modern modes and protocols of operation.

Keywords: satellite modem, domestic element-component base, network topology, DVB-S.

For citation: Obertyuk M. I., Nazarin V. K., Sidyakin A. A. Analysis of existing satellite modems. Directions for development of domestic equipment // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 203–206.

Модемы по многим параметрам определяют технические и экономические характеристики земных станций спутниковой связи. До недавнего времени в отечественных земных станциях спутниковой связи ЗССС широко применялись модемы производства ведущих зарубежных радиоэлектронных фирм EASTAR и GiLAT.

Однако после ввода санкций на поставку в РФ высокотехнологичного радиоэлектронного оборудования, на государственном уровне были предприняты меры по повышению темпов импортозамещения, в том числе в части производства отечественной ЭКБ. В связи с чем появилась необходимость создания и доработки высокотехнологичных комплектующих ЗССС, в том числе модемов, сопоставимых по качеству и эффективности с аналогичными, используемыми до этого, модемами из западных стран.

В современных модемах применяются цифровые методы обработки сигналов. Это позволяет программным способом обеспечивать различные виды модуляции, различные способы кодирования и декодирования.

Основным параметром, определяющим конфигурацию современного отечественного спутникового модема, являются рабочие частоты АЦП/ЦАП относительно переда-

ваемых/принимаемых частот. Цифровая обработка смеси сигнала с всевозможными шумами и помехами без предварительной фильтрации и преобразования частоты предъявляет повышенные требования по скорости работы, динамическому диапазону и энергопотреблению цифровых устройств.

Преобразование сигнала АЦП/ЦАП определяется компромиссом между широкими функциональными возможностями модема с одной стороны и разумными эксплуатационными параметрами, и выполнением требований стандартов электромагнитной совместимости, с другой стороны.

За рубежом при создании современных спутниковых модемов большое внимание уделяется использованию технологии исполнения модема в формате одной СБИС («все в одном»).

На наш взгляд данная технология является более предпочтительной для реализации современных спутниковых модемов. Несмотря на большое время реализации и стоимость программной разработки изделия, стоимость системы, реализованной по технологии «все в одном», будет минимально возможной и сможет гораздо быстрее окупить затраты на разработку в силу отсутствия необходимости реорганизации аппаратной составляющей.

В результате проведенного нами анализа выявлено, что использование отечественной элементной базы является в настоящее время затруднительным из-за отсутствия российского кремниевого производства. Из-за чего компетенции ограничиваются способностью корпусировать кристаллы, сделанные за рубежом. В разработках отечественных дизайн-центров отсутствуют примеры технических решений, отвечающих требованию «все в одном».

Сегодня модем, построенный на иностранной элементной базе экономически более привлекателен. Это приходится признать и с этим «нужно что-то делать». В связи с этим, является важным формирование общего запроса на разработку отечественной элементной базы с учетом современных тенденций организации модемного оборудования.

Следующей проблемой, стоящей на пути разработчика модема на отечественной элементной базе, становится выбор топологий сети, которые он будет поддерживать. В сетях VSAT известны три основных варианта организации связи:

- сеть типа «точка – точка» – простейший случай дуплексной линии связи между двумя удалёнными станциями;
- сеть типа «звезда» – для многонаправленного радиального трафика между центром сети и периферийными (удалёнными) пунктами связи;
- сеть типа «каждый с каждым» – для прямых связей между любыми пунктами сети связи.

Построение сетей «точка – точка» и «каждый с каждым» является самым простым в эксплуатации и управлении, но является самым дорогим. Также, при разработке отечественных и зарубежных модемов заметна тенденция разработки оборудования для спутниковой связи «точка – точка» (см. рис.).

Параметры	Отечественные модемы				Зарубежные модемы		
	СМ-2.6М (Радис Лтд.)	ЯР-1040 (Феникс)	ЭТРА-МД9L (ЭТРА-Плюс)	U7400 (SpaceBridge)	CDM-760 (Comtech EF Data)	M7 (Datum systems)	SX-3000 B (SatixFy)
Топология сети	Точка–точка	Точка–точка, звезда, полносвязная	Точка–точка	Точка–точка	Точка–точка	Точка–точка, точка– многоточка, полносвязная	Точка–точка, точка– многоточка,
Протоколы (режимы) работы	DVB-S2	DVB-S2	DVB-S2	DVB-S2	DVB-S2/S2X	DVB-S2/S2X	DVB-S2X

Топология сети и режимы работы современных отечественных и зарубежных модемов

При построении сетей «звезда» на центральной станции должна быть реализована система синхронизации и сложная система управления ресурсами системы. Это дает возможность строить сети с большим количеством абонентов.

Исходя из представленных выше характеристик режимов работы, при разработке спутниковых модемов, отличных от применяемых на уже сформированном отечественном рынке телекоммуникационных спутниковых услуг, целесообразно вести под конкретные задачи.

Для повышения вариативности использования модемного оборудования может быть реализована разработка адаптируемого приемо-передающего оборудования с перестройкой из спутникового режима в режим вещания напрямую.

Для обеспечения целостности принимаемого сигнала, реализации программной обработки и перевода его в формат, удобный пользователю, необходимо использование более сложных сигнально-кодовых конструкций, ввиду отсутствия аппаратной реализации ряда преобразований.

Для определения структуры транспортных пакетов, методов канального кодирования и схем модуляции при передаче по спутниковым каналам сетей международным консорциумом разработаны стандарты DVB-S, регламентация которых адаптирована для военного назначения отечественных пользователей отражена в требованиях, соответствующих ГОСТ.

На передающей стороне при использовании стандарта DVB-S выполняется преобразование потока данных к каналу:

- транспортное мультиплексирование и рандомизация для дисперсии энергии;
- внешнее кодирование (код Рида-Соломона);
- сверточное перемежение и внутреннее кодирование (сверточный код);
- формирование сигнала в основной полосе частот и его модуляция.

Внутреннее декодирование ведётся по алгоритму Витерби.

Основными отличиями стандарта DVB-S2 (относительно DVB-S) являются:

- увеличение скорости передачи на 30 % при сохранении ширины канала;
- кодирование каналов с применением кодов LDPC;
- использование большего числа алгоритмов модуляции;
- возможность использования в пределах передаваемого потока более широкого набора адаптивного кодирования, модуляции и уровней защиты от ошибок (скоростей кодирования).

Основными отличиями стандарта DVB-S2X (относительно DVB-S2) являются:

- добавлены новые скорости. Применяется только с модуляцией BPSK со скоростями кода 1/5, 11/45, 1/3;
- применяются модуляции с более высокой – APSK 64/128/256.
- введены ряд режимов работы, позволяющих достигать отношения сигнал/шум минус 9,9 дБ;

– есть возможность использования расширения спектра.

Выбор стандарта, используемого при работе разрабатываемого модема, зависит от предполагаемой совместимости разрабатываемых отечественных модемов друг с другом и/или с существующим центровым модемным. В общем случае требуется реализовать в СПО модема «все в одном» поддержку работы, описанную во всех стандартах типа DVB-S.

Для обеспечения совместимости разрабатываемых отечественных модемов оборудованием необходима совместная разработка универсального протокола информационного обмена, принятого всеми предприятиями-изготовителями.

То есть немаловажной представляется разработка универсального стандарта, регламентирующего технические требования к аппаратной части модема, требования к реализации в СПО различных сигнально-кодовых конструкций, обеспечивающих возможность встраивания отечественных модемов в уже существующие и разрабатываемые системы связи.

Резюмируя, основными проблемами, появляющимися у разработчика современного отечественного модема, является отсутствие отечественной элементной базы, удовлетворяющей современным зарубежным тенденциям разработки, отсутствие регламентированного протокола, определяющего структуры транспортных пакетов, методов канального кодирования и схем модуляции для обеспечения возможности комбинирования различного модемного оборудования в одной системе. Основным решением данных проблем мы видим сотрудничество разработчиков в части постановки задач разработки новых современных отечественных стандартов и ЭКБ.

А. М. Сайбараков¹, Д. Ю. Пономарёв¹, А. В. Фарафонов², М. М. Молоков¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация

²Военный институт (научно-исследовательский) ВКА имени А.Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Российская Федерация

ТЕХНОЛОГИЯ SDR В НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. Рассматривается применение программно-определяемых радиосистем (SDR) в низкоорбитальных спутниковых группировках. Показаны ключевые преимущества SDR – гибкость перенастройки связи на орбите, поддержка адаптивных режимов и возможность обновления ПО, а также рассмотрены недостатки, включая энергопотребление и радиационную стойкость. Стоит отметить, что SDR становится важным элементом современных космических аппаратов, обеспечивая их долговечность и адаптивность в динамичной орбитальной среде.

Ключевые слова: технология SDR, космический аппарат, низкоорбитальная спутниковая система, информационный обмен, обновление ПО.

Для цитирования: Сайбараков А. М., Пономарев Д. Ю., Фарафонов А. В., Молоков М. М. Технология SDR в низкоорбитальных спутниковых системах // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 207–209.

A. M. Saybarakov¹, D. Yu. Ponomarev¹, A. V. Farafonov², M. M. Molokov¹

¹ERA Military Innovation Technopolis, Anapa, Russian Federation

²Military (Scientific-Research) Institute of Mozhaisky Military Aerospace Academy
Saint Petersburg, Russian Federation

SDR TECHNOLOGY IN LOW-ORBIT SATELLITE SYSTEMS

Abstract. The article discusses the use of software-defined radio (SDR) systems in low-orbit satellite constellations. The authors show the key advantages of SDR – flexibility of communication reconfiguration in orbit, support for adaptive modes and the ability to update software, as well as disadvantages, including power consumption and radiation resistance. It is worth noting that SDR is becoming an important element of modern spacecraft, ensuring their durability and adaptability in a dynamic orbital environment.

Keywords: SDR technology, spacecraft, low-orbit satellite system, information exchange, software update.

For citation: Saybarakov A. M., Ponomarev D. Yu., Farafonov A. V., Molokov M. M. SDR technology in low-orbit satellite systems // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 207–209.

Введение

Одним из ключевых элементов функционирования космических систем является информационное обеспечение, которое определяет полноту, достоверность и оперативность передачи данных как для наземных пользователей, так и для управления и диагностики космических аппаратов. Особое значение в системе информационное обеспечение занимают низкоорбитальные спутниковые системы связи и передачи данных функционирующие на высотах от 200 до 2000 км. Наиболее известными на сегодняшний день являются:

1. Starlink (SpaceX) – США, крупнейшая в мире низкоорбитальная спутниковая сеть с 8039 действующими аппаратами;

2. OneWeb – Великобритания, доступ к широкополосному интернету с 651 действующими аппаратами.

В состав бортовых систем космического аппарата входят различные радиосистемы для обмена информацией как по радиоканалу «космический аппарат – Земля», так и по межспутниковым каналам связи. Однако стандартные радиосистемы уже не обеспечивают в полной мере решения всего широкого спектра задач информационного обеспечения, поскольку имеют ряд существенных ограничений в использовании с точки зрения гибкости, возможности модернизации и обработки информации.

Таким образом, всё большее значение приобретает использование современных информационных технологий для построения систем информационного обмена с использованием программно изменяемых параметров передающих трактов.

Одной из таких технологий является SDR, в которой ключевые функции обработки радиосигналов, такие как модуляция, демодуляция, фильтрация, кодирование, преобразование частоты и формирование цифровых потоков, реализуются программно на универсальных вычислительных платформах, таких как цифровые сигнальные процессоры или программируемые логические интегральные схемы.

Цель данной статьи – провести анализ применения технологии SDR в низкоорбитальных системах, оценить её преимущества и ограничения, а также рассмотреть перспективы дальнейшего развития.

Принцип работы и архитектура SDR

Суть технологии SDR – программируемый приемопередатчик, способный работать с беспроводными протоколами связи без необходимости изменять или обновлять конфигурацию космического аппарата за счет реализации аналоговых компонентов в цифровой среде.

Конфигурация SDR происходит с помощью ПО. Для этого в него установлены DSP-процессор и ПЛИС, таким образом аппаратная часть SDR-система состоит из следующих ключевых элементов: ADC и DAC преобразователи, ПЛИС, DSP-процессор.

Архитектура и функции программной части SDR сводятся к распределению ресурсов аппаратных средств для их использования различными приложениями связи и делятся на уровни с нулевого по четвертый, которые определяют насколько его функции программируемы. Технология SDR относится ко второму уровню, а третий и четвертый уровни находятся на различных стадиях разработки и внедрения.

Применение технологий SDR для решения проблем информационного обмена наземного контура управления и низкоорбитальными многоспутниковыми группировками

Применение SDR в низкоорбитальных космических аппаратах решает ряд эксплуатационных и технических задач:

1. Гибкость перестройки частотных диапазонов.
2. Многоканальная работа.
3. Адаптивная модуляция и кодирование.
4. Удалённое обновление программного обеспечения.
5. Когнитивные радиотехнологии.

Однако внедрение SDR в бортовые спутниковые системы сопряжено с рядом серьёзных инженерных и эксплуатационных проблем:

1. Повышенное энергопотребление.
2. Уязвимость к ошибкам в ПО.
3. Чувствительность к радиационным эффектам.
4. Сложные программные алгоритмы обработки приводят к задержкам в работе системы.

Таким образом, применение технологии SDR требует соблюдения баланса между гибкостью, надежностью, энергоэффективностью и стоимостью.

Примеры использования SDR в космических системах информационного обмена

Одним из масштабных примеров является NASA SCan Testbed, размещённый на борту Международной космической станции в 2012 году. Проект, реализованный NASA совместно с Per Vices Corp, General Dynamics и Harris Corporation, стал первым полноценным бортовым комплексом для испытания SDR в космических условиях. Проект сыграл важную роль в отработке новых алгоритмов и подтвердил потенциал SDR в космосе.

Ещё одним примером является эксперимент NASA по тестированию стандарта DVB-S2 на базе проекта TechEdSat-8. В эксперименте использовалась SDR-система Ettus USRP B205 mini. В ходе работы космический аппарат успешно прошёл обновление программного обеспечения для поддержки DVB-S2.

Если бортовые SDR-системы обеспечивают гибкость на стороне спутника, то на наземной стороне SDR играет ключевую роль в управлении электронно-управляемыми антеннами. Например, компания ATLAS Space Operations разработала систему LINKS – спутниковую наземную станцию в диапазонах S и X, включающую четыре блока по 16 антенн и SDR-модули.

Заключение

Главным преимуществом применения технологии SDR является гибкость полученных технических решений. В отличие от традиционных систем, технология SDR позволяет изменять модуляцию, кодирование, частоты и протоколы связи на орбите, без необходимости замены аппаратуры. Это особенно критично для низкоорбитальных космических аппаратов, чей срок службы ограничен, а условия эксплуатации динамичны и непредсказуемы. Кроме того, применение технологии SDR позволяет существенно снизить массу, габариты и энергопотребление аппаратуры связи.

Л. Т. Ануарова, С. С. Евтушенко, Д. В. Холодняк

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация

**НОВЫЙ ПАРАМЕТР КАЧЕСТВА ПАССИВНЫХ ЦЕПЕЙ
С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ЗНАЧЕНИЕМ ГРУППОВОГО ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ**

Аннотация. Предложено новое определение параметра качества для корректного сравнения пассивных цепей с отрицательным групповым временем запаздывания (ОГВЗ). Новый параметр качества учитывает денормированное к рабочей частоте значение ОГВЗ, относительную рабочую полосу частот, значения модуля коэффициента передачи и отражения в дБ в рабочей полосе частот, а также площадь подложки, которую занимает практическая реализация цепи с ОГВЗ. Предложенный параметр качества имеет ясный физический смысл, его использование делает сравнение различных цепей с ОГВЗ более наглядным и корректным по сравнению с традиционным подходом. Приведенные количественные оценки качества цепей с ОГВЗ, представленные в литературе, демонстрируют преимущества нового определения параметра качества перед традиционным.

Ключевые слова: групповое время запаздывания, цепь с отрицательным групповым временем запаздывания, параметр качества, рабочая полоса частот, коэффициент передачи, коэффициент отражения.

Для цитирования: Ануарова Л. Т., Евтушенко С. С., Холодняк Д. В. Новый параметр качества пассивных цепей с отрицательным значением группового времени запаздывания // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 210–213.

L. T. Anuarova, S. S. Evtushenko, D. V. Kholodnyak

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russian Federation

**A NOVEL FIGURE OF MERIT OF PASSIVE CIRCUITS
WITH NEGATIVE GROUP DELAY**

Abstract. A novel definition of the figure of merit (FOM) is introduced to compare diverse negative group delay (NGD) circuits correctly. The novel FOM takes into account the NGD value denormalized to the operating frequency, the fractional bandwidth, the magnitude of transmission and reflection coefficients in dB across the bandwidth, and the substrate area occupied by a practical implementation of NGD circuit. The introduced FOM has clear physical meaning and makes comparison of NGD circuits more intuitive and correct than by the traditional FOM. Practical evaluations of the FOM for the NDG circuits reported in the literature are presented and demonstrate advantages of the novel FOM over the traditional one.

Keywords: group delay, negative group delay circuit, figure of merit, operating frequency band, transmission coefficient, reflection coefficient.

For citation: Anuarova L. T., Evtushenko S. S., Kholodnyak D. V. A novel figure of merit of passive circuits with negative group delay // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 210–213.

В последнее время цепи и структуры с отрицательным значением группового времени запаздывания (ГВЗ) находят все более широкое применение в ВЧ- и СВЧ-устройствах, таких как усилители, фильтры, фазовращатели, делители мощности, а также в антенной технике для компенсации и выравнивания ГВЗ, подавления интерференции, обеспечения электромагнитной совместимости и т. п. Отрицательное ГВЗ (ОГВЗ) может иметь место в электродинамических структурах с аномальной дисперсией, активных цепях, или пассивных цепях, содержащих диссипативные элементы. Существующие разработки демонстрируют различные значения ОГВЗ, имеют разные полосы частот, вносимые потери и согласование по входу, что осложняет их сравнение и выбор цепи с ОГВЗ, наиболее подходящей для конкретного применения.

Для сравнения пассивных цепей с ОГВЗ по совокупности их характеристик в литературе используется параметр качества (figure of merit – FOM), который описывается выражением: $FOM_1 = |\tau| \cdot \Delta f \cdot |S_{21}|$, где $|\tau|$ – значение ОГВЗ по абсолютной величине, Δf – рабочая полоса частот, $|S_{21}|$ – модуль коэффициента передачи. Значения ОГВЗ и коэффициента передачи обычно берутся на центральной частоте $f = f_0$, хотя более корректным представляется учитывать их изменение в рабочей полосе частот. Необходимо отметить, что при таком определении параметра качества он принимает значения много меньше единицы, вследствие чего различия между цепями с ОГВЗ не слишком хорошо заметны. Более того, для сравнения цепей с ОГВЗ с учетом занимаемой ими площади подложки значение параметра качества делится на произведение геометрических размеров подложки, нормированных к длине волны на центральной частоте. Это приводит к тому, что численное значение качества практической реализации оказывается выше, чем у исходной «теоретической» цепи с ОГВЗ, имеющей нулевую площадь, что представляется нелогичным и неудобным для практического использования с целью сравнения цепей с ОГВЗ по критерию качества.

Для устранения недостатков традиционного подхода мы предлагаем новое определение параметра качества пассивных цепей с ОГВЗ, которое имеет ясный физический смысл, учитывает как вносимые потери (коэффициент передачи), так и рассогласование по входу (коэффициент отражения), а также позволяет корректно сравнивать различные реализации цепей с ОГВЗ с учетом занимаемой площади подложки.

Согласно определению ГВЗ: $\tau_g = -d\varphi(\omega)/d\omega$, где $\varphi(\omega)$ – фазовая характеристика цепи, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота. ГВЗ отрезка линии передачи длиной l , в которой распространяется ТЕМ-волна, описывается выражением: $\tau_g = l/V_\phi$, где V_ϕ – фазовая скорость. Для линии передачи с воздушным заполнением ($V_\phi = 3 \cdot 10^8$ м/с) погонное ГВЗ: $\tau_{g,1} = 3,3$ нс/м. При длине линии передачи, равной длине распространяющейся в ней волны ($l = \lambda_g = V_\phi/f_0$), ГВЗ такого отрезка линии составляет: $\tau_g = 1/f_0$. Поскольку значение ГВЗ уменьшается с увеличением частоты, для его компенсации на разных рабочих частотах требуются разные значения ОГВЗ. Следовательно, для корректного сравнения цепей с ОГВЗ по критерию качества значение ОГВЗ должно быть денормировано к рабочей частоте: $|\tau| \cdot f_0$. Целесообразно учитывать не абсолютную, а относительную рабочую полосу частот, выраженную в процентах: $\Delta f/f_0 \cdot 100\%$. Помимо вносимых потерь необходимо также принимать во внимание согласование цепи с ОГВЗ по входу.

Таким образом, новый параметр качества пассивных цепей с ОГВЗ может быть определен, как: $FOM_2 = (|\tau| \cdot f_0) \cdot (\Delta f/f_0 \cdot 100\%) \cdot |S_{11}|_{дБ}/|S_{21}|_{дБ} = |\tau| \cdot \Delta f \cdot 100\% \cdot |S_{11}|_{дБ}/|S_{21}|_{дБ}$, где $|\tau|$ – ОГВЗ по абсолютной величине в рабочей полосе частот, $|S_{11}|_{дБ} = \max(20 \cdot \lg(|S_{11}|))$ – максимальное значение коэффициента отражения в дБ в рабочей полосе частот, $|S_{21}|_{дБ} = \min(20 \cdot \lg(|S_{21}|))$ – минимальное значение коэффициента передачи в дБ в рабочей полосе частот. Данное определение предполагает, что в случае идеализации значения любого параметра (например, для цепи, идеально согласованной во всей рабочей полосе частот), значение параметра качества стремится к бесконечности.

Физический смысл нового параметра качества заключается в следующем: $FOM_2 = 100\%$ означает, что цепь с ОГВЗ способна компенсировать ГВЗ, вносимое отрезком линии передачи с $l = \lambda_g$, в относительной полосе частот шириной 100% за счет уменьшения коэффициента передачи в дБ до уровня коэффициента отражения по входу. При $FOM_2 = 200\%$ цепь в два раза превосходит предыдущую по одному из параметров, т. е. либо обеспечивает большее значение $|\tau|$, либо имеет более широкую рабочую полосу частот, меньшие вносимые потери в дБ, или меньший коэффициент отражения в дБ.

Площадь подложки S , которую занимает реализация цепи с ОГВЗ, логично учесть таким образом, чтобы значение параметра качества было максимальным при нулевой площади подложки и уменьшалось с её увеличением: $FOM_2' = FOM_2 \cdot \lambda_g^2 / (S + \lambda_g^2)$.

В таблице приведены расчетные значения параметра качества в традиционном и новом определениях для некоторых цепей с ОГВЗ, представленных в литературе на протяжении последних десяти лет.

№	Источник	τ , нс	f_0 , МГц	Δf , МГц	$\Delta f/f_0$, %	$ S_{21} $, дБ	$ S_{11} $, дБ	FOM_1 , б.р.	FOM_2 , %	S/λ_g^2 , б.р.	FOM_2' , %
1	IEEE TMTT 2014 (62) 2 234-243	-5,0	1962	40	2	-32	-15	0,0005	9,3	-	-
2	IEEE TMTT 2014 (62) 10 2316-24	-6,0	2138	30	1	-7	-17	0,0364	41,3	-	-
3	IEEE TMTT 2016 (64) 11 3604-11	-2,0	1260	15	1	-2	-14	0,0156	28,0	0,28×0,62	23,8
4	PIER 2016 (156), 55-62	-0,5	2140	50	2	-4	-15	0,0256	9,8	-	-
5	Proc. EuMC 2017 13-16	-0,5	2138	40	2	-10	-20	0,0039	3,8	-	-
6	Proc. EuMC 2017 424-427	-3,0	1830	25	1	-29	-12	0,0002	3,1	-	-
7	IEEE TMTT 2018 (66) 5 2170-84	-0,4	2140	320	15	-14	-10	0,0065	10,3	-	-
8	IEEE MWCL 2018 (28) 4 290-292	-0,5	1016	130	12	-18	-25	0,0061	8,9	0,41×0,41	7,6
9	IEEE Access 2018 (6) 57152-59	-2,0	2300	20	1	-4	-11	0,0515	11,0	-	-
10	Int. J. RF MiCAE 2018 (28) 21414	-2,0	1850	20	1	-7	-8	0,0402	4,2	-	-
11	Radioengin., 2018 (27) 4 1070-76	-1,6	998	200	20	-32	-23	0,0004	22,7	0,13×0,32	21,8
12	Proc. RWS 2018 263-266	-2,8	2000	80	4	-18	-15	0,0833	19,0	-	-
13	Proc. EDAPS 2018, 1-3	-0,5	3500	400	11	-20	-11	0,0016	11,0	-	-
14	Int. J. CTA 2019 (47) 6 909-916	-0,2	2140	220	10	-13	-10	0,0024	3,2	-	-
15	IEEE Access 2020 (8) 49908-19	-1,0	496	38	7	-8	-15	0,1898	7,1	0,19×0,50	6,5
16	IEEE Access 2020 (8) 72749-56	-4,0	2436	12	1	-2	-13	0,0298	28,8	-	-
17	IEEE Access 2020 (8) 97707-17	-0,7	2140	40	2	-3	-15	0,0288	12,0	0,70×0,35	9,6
18	Int. J. RF MiCAE 2020 (30) 22341	-0,7	2000	300	15	-16	-10	0,4048	14,3	0,41×0,51	11,8
19	Int. J. RF MiCAE 2020 (30) 22443	-0,4	1000	530	53	-18	-20	0,0030	27,1	0,24×0,34	25,0
20	COMPEL 2021 (40) 3 640-659	-1,0	2330	30	1	-4	-15	0,0250	11,8	-	-
21	IEEE TCAS II 2022 (69) 8 3371-75	-1,0	2140	130	6	-10	-15	0,0152	19,5	0,65×1,18	11,1
22	IEEE Des. Test 2022 (39) 1 67-76	-2,0	3096	6	1	-3	-12	0,0371	4,9	0,57×1,10	3,0
23	IEEE MWCL 2022 (32) 8 957-959	-0,5	1300	100	8	-10	-20	0,0100	10,0	-	-
24	IEEE TCAS II 2023 (70) 6 1916-20	-0,5	680	250	37	-15	-14	0,0322	11,3	0,20×0,38	10,5
25	IEEE TCAS II 2023 (70) 12 4339-43	-0,5	940	346	37	-18	-19	0,0026	18,6	0,09×0,48	17,8
26	Electronics 2024 (13) 3056	-0,5	1000	500	50	-18	-14	0,0043	18,7	0,14×0,29	17,9
27	Cir. Syst. Sign. Proc. 2024 (43) 7564	-1,0	116	92	79	-7	-5	0,0122	6,6	-	-
28	IEEE Access 2024 (12) 28575-581	-0,5	108	90	83	-7	-15	0,0097	10,0	-	-
29	MOTL 2024 (66) 3 2316-2324	-0,5	1900	20	1	-5	-19	0,0505	3,8	0,18	3,2
30	MOTL 2025 (67) 6 1-7	-1,0	250	17	7	-2	-12	0,0464	9,5	-	-

Для цепей с ОГВЗ с близкими значениями традиционного параметра качества (№2,

22 и 24; 5 и 26; 14 и 25; 16 и 17), использование нового определения параметра качества обеспечивает заметно бóльшую разницу между значениями, делая сравнение более наглядным и удобным. В то же время, для цепей № 1 и 4, у которых значения ОГВЗ и $|S_{21}|_{\text{дБ}}$ отличаются в ~ 10 раз, значения параметра качества должны быть сопоставимы, однако при использовании традиционного определения параметра качества они сильно различаются. Новое определение параметра качества устраняет данное противоречие. Аналогичный эффект наблюдается при сравнении следующих цепей: №6 и 14; 12 и 21; 29 и 5; 3 и 16; 13, 24 и 9; 25 и 26. Это наглядно демонстрирует преимущество предложенного параметра качества цепей с ОГВЗ перед традиционным.

М. И. Бойчук

АО «ЛИТ-ФОНОН», Москва, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННОГО КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА В МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОМ КОРПУСЕ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

Аннотация. Рассматривается процесс создания миниатюрного термокомпенсированного кварцевого генератора в металлокерамическом корпусе для поверхностного монтажа с габаритными размерами 7×5×2 мм. Приведена идея цифро-аналоговой компенсации, использованная при создании генераторов ГК362-ТК, разработанных в рамках программы импортозамещения. Установлено, что относительное отклонение рабочей частоты в интервале температур разработанных генераторов не превышает $\pm 2 \times 10^{-6}$. Генератор ГК362-ТК дополнил номенклатуру отечественных генераторов производства АО «ЛИТ-ФОНОН» и может быть применен в системах приема-передачи сигнала особой стабильности.

Ключевые слова: генератор, термокомпенсация, металлокерамический корпус, частота, кварц, резонатор.

Для цитирования: Бойчук М. И. Разработка термокомпенсированного кварцевого генератора в металлокерамическом корпусе для поверхностного монтажа // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 214–216.

M. I. Boychuk

JSC "LIT-PHONON", Moscow, Russian Federation

DEVELOPMENT OF A TEMPERATURE-COMPENSATED QUARTZ OSCILLATOR IN A METAL-CERAMIC CASE FOR SURFACE MOUNTING

Abstract. The paper considers the process of creating a miniature temperature-compensated quartz oscillator in a metal-ceramic case for surface mounting with overall dimensions of 7×5×2 mm. The author presents the idea of digital-analog compensation used in the creation of GK362-TK oscillators developed within the import substitution program. It was found that the relative deviation of the operating frequency in the temperature range of the developed oscillators does not exceed $\pm 2 \times 10^{-6}$. The GK362-TK oscillator has expanded the range of domestic oscillators manufactured by JSC "LIT-PHONON" and can be used in systems for receiving and transmitting signals of special stability.

Keywords: oscillator, temperature compensation, metal-ceramic case, frequency, quartz, resonator.

For citation: Boychuk M. I. Development of a temperature-compensated quartz oscillator in a metal-ceramic case for surface mounting // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 214–216.

Несмотря на интенсивное развитие радиоэлектронной компонентной базы, микро- и нано-электроники, в настоящее время все больше возрастают требования к современным элементам, отвечающим за стабильность и частоту передачи сигнала. Как известно, в качестве таких элементов используются кварцевые генераторы, которые находят широкое применение в самых различных областях техники, в том числе в устройствах генерирования и формирования радиосигналов, в телекоммуникационных и навигационных системах, в космической технике, в системах сбора и обработки информации, в устройствах мобильной связи, микропроцессорах и т.д. В частности, использование кварцевых генераторов в навигационном оборудовании и космической аппара-

туре предъявляет к ним высокие требования по стабильности частоты в широком диапазоне температур, к массогабаритным характеристикам и энергопотреблению. От стабильности частоты зависит устойчивость и качество радиосвязи, скорость цели и точность определения координат.

Целью работы является разработка и исследование термокомпенсированного кварцевого генератора (далее по тексту – ТККГ) в металлокерамическом корпусе для поверхностного монтажа с малыми габаритами, высокой стабильностью частоты в широком интервале рабочих температур и низким токопотреблением на основе кварцевого резонатора и аналого-цифровой термокомпенсации.

Анализ мировых производителей, выпускающих малогабаритные ТККГ, показал, что большинство генераторов такого типа показывают высокую стабильность частоты в интервале рабочих температур от -40 до +85 °С. Такие требования по эксплуатации приемлемы для использования ТККГ в климатических условиях на территории большей части нашей планеты, однако для того чтобы использовать ТККГ в космическом пространстве в качестве опорного частото задающего элемента необходимо поддерживать более широкий диапазон температур от -60 до +85 °С, при этом требования к остальным эксплуатационным и габаритным характеристикам тоже возрастают.

Идея нашей системы цифро-аналоговой компенсации состоит в том, чтобы заранее измерять частотные зависимости отдельных резонаторов во время сборки. Температура контролируется компьютером и изменяется согласно техническому заданию. Для каждого значения температуры микросхема сообщает о частоте резонатора в компьютер через последовательный интерфейс. Частота измеряется с помощью внешнего счетчика частоты и подстраивается под номинальное значение с помощью записи коррекционных данных в цифро-аналоговый преобразователь. Значение температуры, полученное от микросхемы, и значение коррекции задаются в цифро-аналоговом преобразователе внешним компьютером, а затем используются для вычисления коэффициентов коррекционной функции. Процесс протекает в автономном режиме. Коэффициенты, полученные таким способом индивидуально для каждой системы, загружаются в постоянную память. Использование такой схемы с предварительными измерениями позволяет также автоматически корректировать нелинейности в управляющей цепи.

Значение температуры оцифровывается и используется для вычисления значения коррекции с применением заранее сохраненных коэффициентов. Значение коррекции преобразуется в аналоговое напряжение и используется для подстройки резонатора на базовую частоту. Для учета нелинейностей, возникающих в аналогово-цифровом и цифро-аналоговом преобразователях, а также в варикапе, в качестве корректирующей функции используется полином пятого порядка.

Оцифрованное значение напряжения зависит от температуры, и является входным для полиномиального генератора, который вычисляет значение многочлена для заданной температуры.

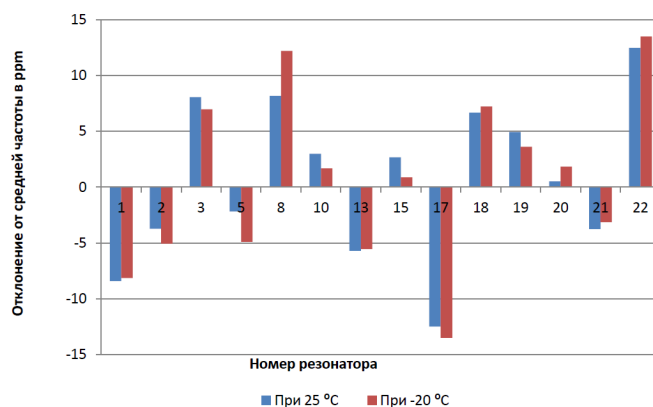
Для реализации вышеизложенной идеи термокомпенсации была спроектирована интегральная микросхема К5860ГН2Н4, в состав которой вошли следующие элементы: датчик температуры, синтезатор компенсирующей функции, стабилизатор напряжения управляемый напряжением генератор, буферный каскад.

Кроме того, в ходе создания ТККГ были разработаны и созданы кварцевые резонаторы РК563 с габаритными размерами 5×3,2×1,1 мм. Для того чтобы процесс термокомпенсации проходил наиболее качественно необходимо задать ряд дополнительных требований к параметрам резонаторов. Для первой партии резонаторов были сформулированы следующие требования:

- номинальная частота – 11,999820 МГц;
- нагрузочная емкость настройки – 9 пФ.

Частота выбрана на 15×10^{-6} ниже номинальной частоты ТККГ по причине равенства конечно частоты настройки частоте максимума при минус 20°C.

После отбраковки была получена партия из 14 годных резонаторов. На рисунке представлен диапазон изменения частот в партии при разных температурах. Разброс примерно постоянный на всем диапазоне температур. А максимальный разброс при температуре минус 20°C не превышает $\pm 13,5$. Частота компенсации выбрана в середине диапазона разброса при температуре минус 20°C, с условием того, что отклонение частоты вниз не должно превышать перестройку за счет магазина емкостей (16×10^{-6}).



Диапазон разброса частот в партии резонаторов при температурах минус 20°C и 25°C

Кроме проведения различного рода исследований и настройки генераторов на нужную частоту, при помощи программы разработан и реализован алгоритм выбора номинальной частоты кварцевых резонаторов.

От частоты резонатора напрямую зависит частота, на которой будет осуществляться термокомпенсация. Так как номинальная частота задается заказчиком, необходимо было разработать алгоритм, согласно которому можно определить соответствующую частоту резонатора. Частота резонатора в свою очередь будет меняться за счет влияния микросхемы.

С помощью исследовательской программы был разработан следующий алгоритм:

$$f_n = f_k + \Delta f_m - \Delta f_d,$$

где f_n – частота настройки, f_k – частота компенсации, Δf_m – уход частоты после монтажа, Δf_d – уход частоты при минус 20°C.

В процессе разработки алгоритма оказалось достаточно сложным найти численные значения ухода частоты после монтажа и уход частоты при максимуме температурно-частотной характеристики, который достигается при температуре минус 20°C. После большого количества замеров опытным путем удалось установить номинальную частоту резонатора. Например, при частоте термокомпенсации 12 МГц частота резонатора должна составлять 11 999 800 Гц согласно алгоритму.

В результате проделанной работы на предприятии АО «ЛИТ-ФОНОН» был разработан и внедрен в производство термокомпенсированный генератор ГК362-ТК в металло-керамическом корпусе для поверхностного монтажа размером $7 \times 5 \times 2$ мм с температурной нестабильностью частоты $\pm 2 \times 10^{-6}$ в диапазоне температур от минус 60 до +85°C и питающим напряжением 5В. Исследованы и устранены технологические проблемы, возникшие при производстве ТККГ в малогабаритном металлокерамическом корпусе.

И. В. Веремеев^{1,2}, А. С. Веремеева^{1,2}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)

Омск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОДОВ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ STW-РЕЗОНАТОРОВ

Аннотация. Приведены экспериментальные исследования STW-резонаторов на срезе YX/36°+90° кварца, показывающие возможность смещения температурно-частотной характеристики и оптимального диапазона рабочих температур резонатора за счет изменения толщины и ширины электродов металлизации. Полученные результаты могут применяться для создания STW-резонаторов, используемых в изделиях различных климатических исполнений.

Ключевые слова: генератор, резонатор STW, температурная стабильность.

Для цитирования: Веремеев И. В., Веремеева А. С. Влияние параметров металлизации электродов на температурную стабильность STW-резонаторов // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 217–218.

I. V Veremeev^{1,2}, A. S Veremeeva^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

Omsk, Russian Federation

INFLUENCE OF ELECTRODE METALLIZATION PARAMETERS ON THE STW-RESONATOR TEMPERATURE STABILITY

Abstract. This paper presents experimental studies of STW resonators on the 36°YX90° cut quartz, demonstrating the possibility of shifting the temperature-frequency characteristic and the optimal operating temperature range by changing the thickness and width of metallization electrodes. The experimental results can be used for development of STW resonators for devices in various climatic versions.

Keywords: oscillator, STW resonator, stability.

For citation: Veremeev I. V., Veremeeva A. S. Influence of electrode metallization parameters on the STW-resonator temperature stability // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 217–218.

Миниатюрные маломощные генераторы на поверхностных акустических волнах (ПАВ) широко используются в качестве эталонов частоты и времени в различных электронных системах, особенно в устройствах связи и навигации. Частотоподающим элементом в таких генераторах выступает ПАВ-резонатор, обладающий высоким резонансными частотами основной гармоники (100-2500 МГц) и устойчивостью в внешнем воздействующем факторам (ВВФ). Важным параметром ПАВ-резонатора является стабильность частоты, определяемая его температурно-частотной характеристикой (ТЧХ). На температурную стабильность ПАВ-резонатора оказывает влияние ряд факторов, среди которых можно выделить две основные группы:

– конструктивно-топологические параметры кристалла ПАВ-резонатора;

– конструктивно-технологические особенности монтажа кристалла ПАВ-резонатора в корпус.

Ключевым фактором обеспечения стабильности является выбор материала пьезоподложки и типа распространяющейся акустической волны. Для создания ПАВ-резонаторов наиболее популярным материалом являются кварцевые пьезоподложки. Влияние угла поворота кристаллографического среза кварца на температурную стабильность резонаторов подробно рассмотрено в работе. Одним из оптимальных срезов кварца является $YX/36^\circ$, помимо ПАВ Рэлея в нем также распространяется и высокоскоростная (5000 м/с) поверхностная поперечная акустическая волна (STW), подходящая для реализации высокочастотных резонаторов.

Заметное влияние на ТЧХ резонатора оказывает не только выбор материала пьезоподложки, но и параметры металлизированной топологии, нанесённой на нее для возбуждения акустических волн. Изменение материала электродов и адгезионного подслоя, толщины металлизации (h), а также коэффициента металлизации подложки (K_m – соотношение ширины электрода к суммарной ширине электрода и зазора) все это приводит к сдвигу температуры экстремума (T_0) или крутизны ТЧХ.

Приведены измеренные ТЧХ в диапазоне температур от минус 60°C до 85°C для экспериментальных образцов STW-резонаторов на частоту 766 МГц трех типов (по 2 шт. в выборке) Образцы выполнены на пьезоподложке кварца среза $YX/36^\circ$, материал электродов – Al, Si, 99/1% с тонким адгезионным подслоем ванадия.

Образцы первого типа ($h=0,13$ мкм, $K_m=0,4$) при близкой к нормальным климатическим условиям $T_0=30^\circ\text{C}$ обеспечивают относительный температурный уход ($\Delta f/f_0$) не превышающий значений: $100 \cdot 10^{-6}$ в температурном диапазоне от минус 20°C до 60°C и $320 \cdot 10^{-6}$ в температурном диапазоне от минус 60°C до 85°C .

У STW-резонаторов второго типа ($h=0,2$ мкм, $K_m=0,4$) экстремум ТЧХ смещается в область отрицательных температур $T_0=\text{минус } 15^\circ\text{C}$, а смещение частоты при температуре $+85^\circ\text{C}$ увеличивается до значения $400 \cdot 10^{-6}$. У образцов третьего типа ($h=0,24$ мкм, $K_m=0,35$) похожие результаты: $T_0=\text{минус } 10^\circ\text{C}$, $\Delta f/f_0=370 \cdot 10^{-6}$. Небольшое изменение между ТЧХ образцов второго и третьего типа объясняется тем, что увеличение толщины металлизации при уменьшении K_m и ширины электродов не приводит к увеличению массы электрода и влияния на ТЧХ. Такие резонаторы не оптимальны для работы в широком температурном диапазоне, однако представляют интерес для применения в морозоустойчивых изделиях с климатическими исполнениями УХЛ, ХЛ, обладая $\Delta f/f_0=100 \cdot 10^{-6}$ в диапазоне от минус 60°C до 40°C .

В работе приведены экспериментальные исследования STW-резонаторов на срезе $YX/36^\circ+90^\circ$ кварца, показывающие возможность смещения температурно-частотной характеристики и оптимального диапазона рабочих температур резонатора за счет изменения толщины и ширины электродов металлизации. Полученные результаты могут применяться для создания STW-резонаторов, используемых в изделиях различных климатических исполнений.

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

А. Л. Ворожцов^{1,2}

¹Центральное конструкторское бюро автоматики, Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиопизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ НА ПЛАСТИНЕ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

Аннотация. Доклад посвящен проблеме измерения коэффициента шума интегральных схем на пластине на зондовой станции методом Y-фактора («горячего» источника). Показаны недостатки метода «горячего» источника применимо к зондовым измерениям и предложен возможный путь решения. Приведены результаты зондовых измерений методом Y-фактора, реализованного на разных приборах: анализатора спектра R&S FSW26 и векторного анализатора цепей C4220.

Ключевые слова: зондовые СВЧ измерения, коэффициент шума, метод Y-фактора.

Для цитирования: Ворожцов А. Л. Измерение коэффициента шума интегральной схемы малошумящего усилителя на пластине в СВЧ диапазоне // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 219–221.

A. L. Vorozhtsov^{1,2}

¹Central design bureau of automatics, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

MEASUREMENT OF THE NOISE FIGURE OF AN INTEGRATED CIRCUIT OF A LOW-NOISE AMPLIFIER ON A WAFER IN THE MICROWAVE RANGE

Abstract. The report is devoted to the problem of measuring the noise figure of integrated circuits on a wafer on a probe station by the Y-factor method ("hot" source). This paper shows the disadvantages of the "hot" source method applicable to probe measurements and proposes a possible way of solution. The report also presents the results of probe measurements using the Y-factor method implemented on different devices: R&S FSW26 spectrum analyzer and C4220 vector network analyzer.

Keywords: Probe microwave measurements, noise figure, Y-factor method.

For citation: Vorozhtsov A. L. Measurement of the Noise Figure of an Integrated Circuit of a Low-Noise Amplifier on a wafer in the Microwave Range // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 219–221.

Измерение S-параметров и амплитудных характеристик интегральных схем МШУ на пластине на зондовой станции давно применяется в микроэлектронном производстве и дает очень точные результаты, так как существуют специальные калибровочные пластины для зондовых измерений и все потери и рассогласования в пассивных цепях (коаксиальные кабели и переходы, зондовые контакты и т.п.) между портами прибора и контактными площадками исследуемых кристаллов интегральных схем учитываются векторной калибровкой. Но измерение коэффициента шума (Кш) кристаллов интегральных схем на пластине на зондовой станции методом Y-фактора («горячего» источника) технически гораздо более сложная задача. Точность измерения Кш напрямую зависит от величины потерь и рассогласований между калиброванным источником шума (он же генератор шума, ГШ) и входом интегральной схемы МШУ. Эти искажения крайне

сложно учесть. Но для случая отдельных кристаллов, установленных в устройство подключения, есть техническая возможность присоединить разъём ГШ непосредственно к разъёму устройства подключения с кристаллом. Цепь «ГШ – МШУ», таким образом, практически исчезает, и всё её влияние обусловлено неизбежными потерями на коаксиально-микрополосковом переходе устройства подключения. Эти потери, как правило, малы и незначительны и ими можно пренебречь. Проводя измерения на зондовой станции, технически невозможно подключить коаксиальный разъём ГШ к бескорпусному интегральному элементу (схеме) на пластине. Наличие между коаксиальным разъёмом генератора шума и контактной площадкой кристалла МШУ дополнительной цепи из коаксиального кабеля (длиной 0,7–1 м) и зондовой головки будет непредсказуемо влиять на результаты, т.к. её невозможно скомпенсировать традиционной векторной калибровкой. На рис. 1 приведены шумовые характеристики одного и того же кристалла МШУ 0918, измеренные в устройстве подключения и на зондовой станции без попыток коррекции искажений от цепи «ГШ – МШУ» каким-либо способом. Из графиков видно, что полученные значения зондовых измерений отличаются от результатов в устройстве подключения на 2-4 дБ.

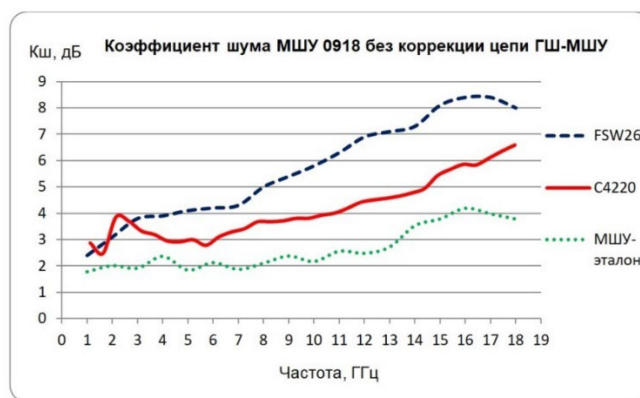


Рис. 1. Измерение коэффициента шума МШУ 0918 на пластине без исключения цепей

В такой ситуации целесообразно рассмотреть возможность использовать комбинацию методов коррекции ошибок измерений и найти, как добавить к калибровке метод де-эмбендинга или Исключения / Встраивания виртуальных цепей для достижения точности измерений Кш на пластине $\pm 0,5$ дБ относительно измерений в устройстве подключения. Целью данной работы стал поиск такого метода зондовых измерений коэффициента шума интегральных схем на пластине.

Традиционный метод Y-фактора, доступный нам сегодня, без исключения влияния цепи «ГШ-МШУ» даёт неучтённую «добавку» к значению Кш, однако в некоторых зарубежных моделях анализаторов спектра присутствует возможность скалярного учета потерь в пассивных цепях – это функция «LOSS». Скалярность функции «LOSS» обусловлена тем, что модель потерь в цепи описывается в ней только амплитудными значениями коэффициента передачи. В то же время в 2024 г. российский производитель векторных анализаторов цепей, компания ООО «Планар» (г. Челябинск), выпустила улучшенный вариант реализации метода «горячего» источника с дополнительным предусилителем и опцией «NF» и с заявляемой возможностью векторной коррекции потерь от исключаемых пассивных цепей, в том числе и цепи «ГШ-МШУ». Для проверки обоих методов был использован кристалл МШУ 0918 с известным коэффициентом шума и исследован обоими способами: с помощью анализатора спектра R&S FSW26 с опцией K30 и функцией «LOSS» и векторного анализатора цепей Кобальт C4220 с опцией «NF» и предусилите-

лем. Генератор шума использовался производства НПФ «Микран» ГШМЗ-50С-05 с избыточным шумовым коэффициентом $ENR \sim 15$ дБ.

Предварительно S-параметры в векторной форме (амплитудные и фазовые значения коэффициентов передачи и отражения) цепи «ГШ – МШУ» были измерены на анализаторе цепей Кобальт С4220. Затем в модуль «Loss Input» анализатора спектра FSW26 были внесены только амплитудные значения потерь, т.к. анализатор спектра не работает с фазовой составляющей передачи (потерь), потому что не может учитывать отражения в тракте. Аналогично, в опцию «NF» анализатора цепей С4220 также были внесены данные цепи «ГШ – МШУ», но в более полной, векторной форме, т.е. с учетом не только амплитудных, но и фазовых составляющих.

Измерения производились в два этапа. На первом этапе Кш измерялся с помощью анализатора спектра R&S FSW26. Результаты измерений без коррекции цепи «ГШ-МШУ» были приведены на рис. 1, штриховая линия «FSW26». Затем измерения на FSW26 повторялись, но уже с включённой функцией коррекции потерь «LOSS», куда предварительно были занесены данные цепи «ГШ – МШУ». Результаты измерений приведены на рис. 2, штриховая линия «FSW26».

На втором этапе измерений анализатор спектра FSW26 заменялся на Кобальт С4220 и также снимались две кривые: без исключения цепей «ГШ – МШУ» и с её исключением. Результаты измерений приведены на рис. 1 и 2 в виде сплошных линий – «С4220» и «С4220» соответственно. Пунктирной линией «МШУ эталон» на рис. 1 и 2 приведены результаты измерения МШУ 0918 в устройстве подключения.

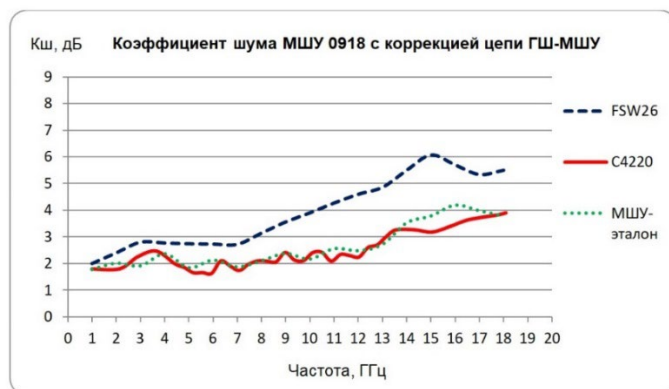


Рис. 2. Измерение коэффициента шума МШУ 0918 на пластине с исключением цепей

Как видно из рис. 2, кривая зависимости коэффициента шума МШУ 0918 от частоты, измеренная на зондовой станции на пластине векторным анализатором цепей Кобальт С4220 с опцией «NF» и предусилителем практически полностью совпадает с результатами измерений образца МШУ 0918 в устройстве подключения. Это говорит о найденной технической возможности зондовых измерений коэффициента шума кристаллов интегральных схем на пластине с приемлемой точностью $\pm 0,5$ дБ относительно измерений в устройстве подключения.

В заключение надо отметить, что отечественная реализация метода Y-фактора на базе векторного анализатора цепей Кобальт С4220, производства ООО «Планар» показала лучшие результаты для измерений коэффициента шума кристаллов интегральных схем на пластине на зондовой станции, чем зарубежное решение от Rohde & Schwarz на базе анализатора спектра R&S FSW26 с опцией K30.

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

А. М. Воронцов, Д. Б. Пономарев, С. С. Лутченко

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИНИАТЮРНЫХ ПЛАНАРНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПИТАНИЯ

Аннотация. Суть работы заключается в определении основных параметров посредством компьютерного моделирования планарного трансформатора для преобразователей питания в программном продукте ANSYS 2025. Произведены оценка параметров полученного трансформатора и сравнение данных моделирования с расчетными.

Ключевые слова: планарный трансформатор, преобразователь напряжения, компьютерное моделирование.

Для цитирования: Воронцов А. М., Пономарев Д. Б., Лутченко С. С. Моделирование миниатюрных планарных трансформаторов для преобразователей питания // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 222–223.

A. M. Vorontsov, D. B. Ponomarev, S. S. Lutchenko

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

SIMULATION OF MINIATURE PLANAR TRANSFORMERS FOR POWER CONVERTERS

Abstract. The purpose of the work is to determine the main parameters by means of computer modeling of a planar transformer for power converters in the ANSYS 2025 software product. The parameters of the obtained transformer are assessed and the modeling data are compared with the calculated ones.

Keywords: planar transformer, voltage converter, computer simulation.

For citation: Vorontsov A. M., Ponomarev D. B., Lutchenko S. S. Simulation of miniature planar transformers for power converters // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 222–223.

В рамках данной статьи предлагается методика расчёта миниатюрных планарных трансформаторов с высотой до 8 мм, используемых в DC/DC-преобразователях и разделительных токовых системах, также представлены результаты их моделирования в Ansys 2025. Планарные трансформаторы, в отличие от классических с проволочными обмотками, используют дорожки на многослойной печатной плате (PCB) и ферритовые сердечники, что обеспечивает плотность мощности до 21,5 кВт/л и КПД до 98%. Статья расширяет тезисы, представленные в работе, описывая проектирование, моделирование, сравнение с классическими аналогами, конструкционные особенности и оценку параметров на основе расчётных и смоделированных данных.

Планарные трансформаторы используют обмотки в виде медных дорожек на 4–8-слойной PCB и ферритовый сердечник высотой 5–8 мм, что обеспечивает компактность, важную для портативной электроники. Высокий КПД (95–98%) достигается за счёт низких паразитных параметров и интерливинга обмоток, который снижает потери на 20–30%. Работа на высоких частотах (100–700 кГц) позволяет уменьшить размеры, а автоматизированное производство PCB снижает стоимость при серийном производстве.

Плоская конструкция улучшает теплопередачу. Разработка планарных трансформаторов дороже из-за необходимости проектирования РСВ и симуляции в Ansys, а их мощность ограничена 400 Вт из-за тепловыделения. Также требуется тщательное проектирование изоляции для высоковольтных приложений.

Конструкция моделируемого планарного трансформатора включает ферритовый сердечник, многослойную РСВ и изоляцию. Используется сердечник E18/PLT18 с эффективной площадью сечения $0,39 \text{ см}^2$, объёмом $0,8 \text{ см}^3$ и высотой около 5 мм. Обмотки выполняются на 4–8-слойной РСВ с медными дорожками толщиной 35–70 мкм и шириной 1–3 мм. Интерливинг первичных и вторичных обмоток минимизирует паразитную индуктивность. Изоляция с полиимидными слоями обеспечивает более 3–7 мм и гальваническую развязку до 1500–4000 В по стандартам IEC 60950. Исходные параметры, которые были взяты для расчета: входное напряжение 70 В, выходное 8,2 В (основной) и 8 В (для ИС), частота 120 кГц, рабочий цикл 0,48, мощность 8 Вт, температура окружающей среды 60°C, допустимый нагрев 35°C.

Предложенная методика расчёта включает следующие этапы: выбор сердечника (E18/PLT18, феррит 3C90), определение пиковой индукции ($B_{\text{peak}} = 0,16 \text{ Тл}$ для минимизации потерь), расчёт числа витков ($N_1 = 22$, $N_2 = 3$), индуктивности ($L_p \approx 774 \text{ мкГн}$) и потерь (сердечник: 344 мВт, медные: 48 мВт). Моделирование проводилось в Ansys 2025 (Maxwell) для анализа магнитных, электрических и тепловых характеристик. Создавалась 3D-модель с сердечником E18/PLT18 и 4-слойной РСВ (22 витка первичной обмотки, 3 витка вторичной). Задавались параметры: феррит 3C90 с пиковой индукцией 0,16 Тл, сопротивление дорожек 0,22 Ом (первичная) и 0,01 Ом (вторичная). Рассчитывались S-параметры для оценки паразитных ёмкостей, индуктивностей и потерь. Результаты моделирования: индуктивность первичной обмотки 774 мкГн, потери в сердечнике 344 мВт (по формуле Штейнмеца с $C_m = 7,13 \times 10^{-3}$ при 120 кГц), медные потери 8 мВт (первичная, $I_{\text{rms}} = 0,19 \text{ А}$) и 40 мВт (вторичная, $I_{\text{rms}} = 2 \text{ А}$). Общие потери составили 392 мВт, КПД – около 95%. S-параметры показали отклонение расчётных значений от смоделированных менее чем на 5%, что подтверждает точность методики.

В рамках проделанной работы были рассмотрены планарные трансформаторы, предложена методика расчёта параметров для проектирования, построена модель и проведено компьютерное моделирование в Ansys 2025. Планарные трансформаторы демонстрируют высокую компактность, что делает их подходящими для DC/DC-преобразователей. Однако их мощность ограничена 400 Вт, а высокие токи требуют активного охлаждения. Миниатюрные планарные трансформаторы превосходят классические аналоги в компактных системах.

Н. А. Давлеткильдеев^{1,3}, А. О. Никифорова², С. В. Кривальцевич^{2,3}

¹Омский научный центр СО РАН, Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

³Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ
АНАЛОГОВЫХ ВЧ-, УВЧ-СИГНАЛОВ В РАДИОФОТОННОЙ ЛИНИИ
С ПРЯМОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ, ПОСТРОЕННОЙ НА БАЗЕ
ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА**

Аннотация. Исследовано влияние типа лазерного диода и положения рабочей точки на его ватт-амперной характеристике на величину нелинейных искажений аналоговых ВЧ-, УВЧ-сигналов при их передаче по радиопотонной линии с прямой модуляцией лазерного излучения. Количественная оценка нелинейных искажений по параметру затухания нелинейности по мощности второй и третьей гармоник показала преимущество лазерного диода с распределенной обратной связью по сравнению с лазерным диодом с резонатором Фабри-Перо.

Ключевые слова: аналоговая радиопотонная линия, прямая модуляция лазерного излучения, сигналы ВЧ-, УВЧ-диапазонов, нелинейные искажения.

Для цитирования: Давлеткильдеев Н. А., Никифорова А. О., Кривальцевич С. В. Сравнительный анализ нелинейных искажений аналоговых ВЧ-, УВЧ-сигналов в радиопотонной линии с прямой модуляцией, построенной на базе лазерных диодов различного типа // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 224–226.

N. A. Davletkildeev^{1,3}, A. O. Nikiforova², S. V. Krivaltsevich^{2,3}

¹Omsk Scientific Center SB RAS, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

³Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

**COMPARATIVE ANALYSIS OF NONLINEAR DISTORTIONS
OF ANALOG HF-UHF SIGNALS IN A RADIOPHOTONIC LINE
WITH DIRECT MODULATION BUILT ON THE BASIS OF
VARIOUS LASER DIODES**

Abstract. The paper examines the influence of laser diode type and the position of its operating point on its watt-ampere characteristic on the magnitude of nonlinear distortions of analog HF-UHF signals transmitted over a radiophotonic line with direct modulation of laser radiation. A quantitative estimation of nonlinear distortions based on the attenuation parameter of the nonlinearity in the power of the second and third harmonics demonstrated the advantage of a laser diode with distributed feedback over a laser diode with a Fabry-Perot resonator.

Keywords: analog radiophotonic line, direct modulation of laser radiation, HF-UHF range signals, non-linear distortions.

For citation: Davletkildeev N. A., Nikiforova A. O., Krivaltsevich S. V. Comparative analysis of nonlinear distortions of analog HF-UHF signals in a radiophotonic line with direct modulation build on the basis of various laser diodes // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 224–226.

Аналоговые волоконно-оптические системы передачи радиочастотных сигналов – радиофотонные линии (РЛ) находят широкое применение в современных системах связи благодаря низким потерям в оптическом волокне (ОВ), широкой полосе пропускания, низким массогабаритным характеристиками и гибкости ОВ, невосприимчивости к электромагнитным помехам и отсутствию электромагнитного излучения во внешнюю среду. К недостаткам РЛ относятся линейные и нелинейные искажения, которые проявляются в спектре выходного сигнала в виде неравномерности частотной характеристики и появления высших гармоник частоты модуляции.

Основным источником нелинейных искажений сигнала в РЛ с прямой модуляцией оптического излучения является лазерный диод, в котором выходная мощность излучения модулируется за счет изменения величины тока накачки модулирующим сигналом. В качестве источника оптического излучения в РЛ с прямой модуляцией наибольшее распространение получили лазерные диоды с резонатором Фабри–Перо (РФП), обладающие сравнительно простой конструкцией и низкой стоимостью. Его недостатком является относительно широкий спектр излучения. Другим распространенным типом лазера является лазерный диод с распределенной обратной связью (РОС), обеспечивающий высокую мощность и малую ширину спектра излучения.

Целью работы является сравнительный анализ нелинейных искажений аналоговых ВЧ–УВЧ-сигналов при их передаче по РЛ линии с прямой модуляцией, построенной на базе лазерных диодов с РФП и РОС.

В работе исследовалась РЛ, которая состояла из передающего оптического модуля (ПОМ) с прямой модуляцией на основе лазерных диодов с РФП и РОС, приемного оптического модуля (ПрОМ) на основе InGaAs PIN фотодиода и оптического изолятора.

Оптическая мощность излучения ПОМ в немодуляционном режиме P_{onm} измерялась с помощью измерителя оптической мощности.

Для количественной оценки нелинейных свойств РЛ были определены затухания нелинейности по второй и третьей гармоникам. Для этого в спектре выходного сигнала РЛ регистрировалась амплитуда основной гармоники относительно второй и третьей гармоник при подаче одночастотного сигнала мощностью 0 дБм.

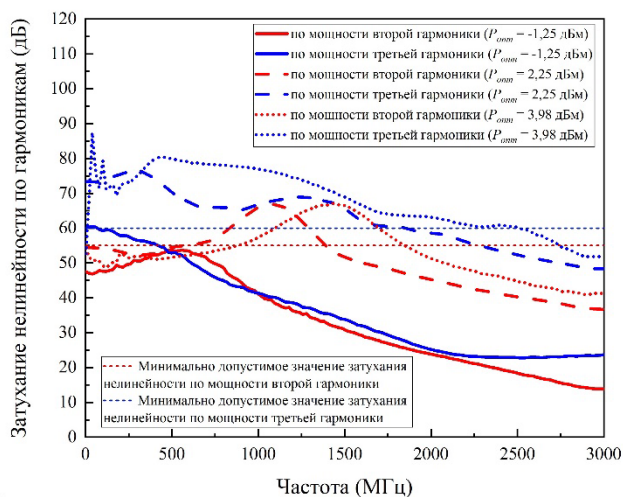
Измерения проводились в диапазоне частот входного сигнала от 3 МГц до 3 ГГц при трех фиксированных уровнях оптической мощности P_{onm} для каждого ПОМ: в нижней, средней и верхней частях линейного участка ватт-амперных характеристик. Это позволило исследовать влияние положения рабочей точки (мощности лазерного излучения) на величину нелинейных искажений.

На рисунке представлены частотные зависимости затухания нелинейности по второй и третьей гармоникам для ПОМ на основе лазерного диода с РФП (а), ПОМ на основе лазерного диода с РОС (б).

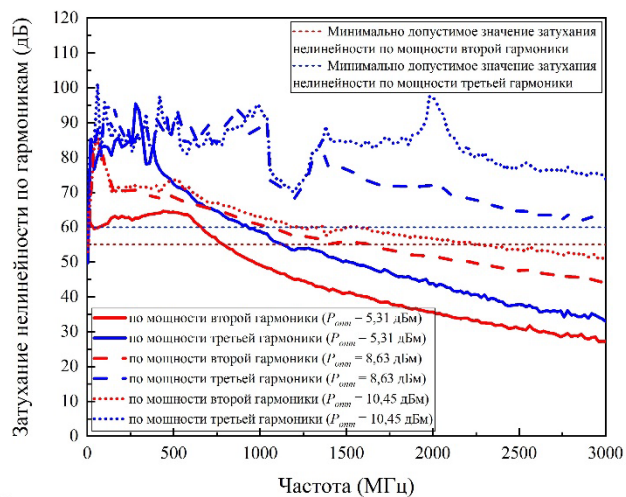
Исследование показало, что в случае ПОМ на основе лазера с РФП в середине линейного участка ватт-амперной характеристики (2,25 дБм) затухание нелинейности по мощности третьей гармоники превышает минимально допустимое значение 60 дБ в диапазоне частот от 3 МГц до 1,8 ГГц, а при увеличении мощности излучения до 3,98 дБм – до частоты входного сигнала 2,5 ГГц. При малой мощности (–1,25 дБм) превышение минимально допустимого значения затухания нелинейности по мощности третьей гармоники наблюдается лишь до 80 МГц, а минимально допустимый уровень по мощности второй гармоники 55 дБ не достигается. При увеличении мощности оптического излучения максимум затухания по второй гармонике смещается в область более высоких частот и на 12 дБ превышает минимально допустимое значение.

Для передающего модуля на основе лазера с РОС в середине линейного участка ватт-амперной характеристики (8,63 дБм) затухание по мощности второй гармоники превышает минимально допустимое значение в диапазоне частот до 1640 МГц, а при

мощности оптического излучения 10,45 дБм – до 2240 МГц. При малой мощности (5,31 дБм) превышение минимально допустимого значения наблюдается лишь до 800 МГц по мощности второй гармоники и до 940 МГц по мощности третьей, тогда как при мощности оптического излучения 8,63 дБм затухание нелинейности по третьей гармонике превышает минимально допустимый уровень во всем исследуемом диапазоне частот.



(а)



(б)

Частотная зависимость затухания нелинейности по мощности второй и третьей гармоник:

- ПОМ на основе лазерного диода с резонатором Фабри-Перо;*
- ПОМ на основе лазерного диода с распределенной обратной связью*

В обоих случаях наблюдается уменьшение затухания нелинейности с ростом частоты входного сигнала, наиболее выраженное в диапазоне частот 1–3 ГГц. В случае ПОМ на основе лазерного диода с РФП с увеличением мощности оптического излучения на частоте входного сигнала 3 ГГц значения затухания нелинейности по второй гармонике увеличиваются от 13 до 41 дБ, по мощности третьей – от 23 до 52 дБ, тогда как для лазерного диода с РОС – от 27 до 51 дБ по мощности второй гармоники и от 33 до 74 дБ по мощности третьей гармоники, соответственно.

Таким образом, выбор рабочей точки в верхней части линейного участка ватт-амперной характеристики позволяет значительно увеличить затухание нелинейности по гармоникам в радиофотонной линии. Применение лазерного диода с распределенной обратной связью обеспечивает более высокие значения затухания нелинейности по гармоникам в широком диапазоне частот по сравнению с лазерным диодом на основе резонатора Фабри-Перо, что демонстрирует их преимущество как источников излучения для радиофотонных систем передачи сигналов ВЧ-УВЧ диапазона.

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

П. Н. Дробот¹, А. И. Солдатов²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Томск, Российская Федерация

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Томск, Российская Федерация

КРЕМНИЕВЫЙ ОСЦИЛЛИСТОРНЫЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПРЕИМУЩЕСТВА

Аннотация. Датчики с частотным выходом четверть века назад были выделены в отдельный класс датчиков, признаваемый во всем мире. Привлекательными для разработчиков аппаратуры эти датчики делают их особые достоинства и преимущества, связанные с частотным выходом. Внутри этого класса датчиков имеются самые разные датчики, построенные на разных принципах. Поэтому особую актуальность и практический интерес представляет сравнительный анализ характеристик этих датчиков и сопоставление их с характеристиками кремниевого осциллисторного датчика с частотным выходом.

Ключевые слова: осциллистор, частотный выход, датчик температуры, частота, линейная характеристика, чувствительность.

Для цитирования: Дробот П. Н., Солдатов А. И. Кремниевый осциллисторный датчик температуры: сравнительный анализ и преимущества // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 227–229.

P. N. Drobot¹, A. I. Soldatov²

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

SILICON OSCILLISTOR TEMPERATURE SENSOR: COMPARATIVE ANALYSIS AND ADVANTAGES

Abstract. Sensors with a frequency output were separated into a separate class of sensors, recognized worldwide, a quarter of a century ago. These sensors are attractive to equipment designers due to their special advantages and benefits related to the frequency output. Within this class of sensors, there are various sensors built on different principles. Therefore, a comparative analysis of the sensor characteristics and their comparison with the characteristics of the silicon oscillistor sensor with a frequency output are of particular relevance and have great practical interest.

Keywords: oscillistor, frequency output, temperature sensor, frequency, linear characteristic, sensitivity.

For citation: Drobot P. N., Soldatov A. I. Silicon oscillistor temperature sensor: comparative analysis and advantages // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 227–229.

В конце прошлого века датчики с частотным выходом выделились в особый самостоятельный класс датчиков. Логичным завершением этого процесса стало создание Международной ассоциации International Frequency Sensor Association (IFSA), www.sensorsportal.com. Датчики с частотным выходом обладают целым рядом существенных преимуществ, которые отличают их от традиционных аналоговых датчиков.

Однако и среди датчиков с частотным выходом существуют датчики с более выраженными достоинствами и преимуществами и такими являются кремниевые осцилляторные датчики, сочетающие все преимущества частотного выхода с высокой амплитудой информационного сигнала и линейными выходными характеристиками. Поэтому интересным для практики будет сравнительный анализ различных датчиков с частотным выходом, в первую очередь датчиков температуры.

Датчики с частотным выходом можно разделить на 3 группы:

Группа 1 (основная): датчики с преобразованием $x(t) \rightarrow f(t)$, где $x(t)$ – измеряемая величина, $f(t)$ – частота. Они осуществляют прямое преобразование измеряемой величины в частоту. Например, это осцилляторные датчики.

Группа 2: датчики с преобразованием $x(t) \rightarrow V(t) \rightarrow f(t)$ ($V(t)$ – напряжение, пропорциональное измеряемой величине). Например, это термопары, сопряженные с преобразователем напряжение-частота.

Группа 3: датчики с преобразованием $x(t) \rightarrow P(t) \rightarrow f(t)$ ($P(t)$ параметр). Это индуктивные, емкостные и омические параметрические преобразователи на основе схемных устройств: колебательный контур, релаксационный генератор и др.

Использование осцилляторных датчиков температуры является перспективным при измерении температуры почвы в тепличных хозяйствах, при мониторинге температуры морских и океанических глубин, и при контроле температуры в нефтедобывающих (геологических, геофизических и любых других) скважинах. Применение осцилляторных датчиков с частотным выходом приводит к значительному упрощению схемы мониторинга и повышению ее надежности, к увеличению точности результата и уменьшению затрат на оборудование.

Рассмотрим основные характеристики существующих датчиков с частотным выходом, входящих в указанные выше три группы классификации.

Для анализа остановимся на известных датчиках пяти групп: 1) осцилляторные датчики на основе винтовой неустойчивости в кремнии; 2) осцилляторные датчики на основе винтовой неустойчивости в германии, 3) датчики на основе рекомбинационной неустойчивости в кремнии, 4) пьезокварцевые датчики и 5) схемные преобразователи платинового термосопротивления в частоту.

Датчики первой группы работоспособны в широком интервале температур от жидкого азота до температуры, значительно выше комнатной 77-335 К. Во всем этом широком диапазоне температур выходная характеристика в целом нелинейная с линейными участками в начале ($T=77-105\text{K}$) и в конце ($T=263-335\text{K}$) диапазона. При этом датчик обладает высокой амплитудой выходного сигнала, что делает не нужным предварительное усиление и высокой чувствительностью df/dT , Гц/К, которая значительно возрастает с понижением температуры: от 3100 ($T>263\text{K}$) до 40000 ($T=77\text{ K}$). Причём выходную характеристику можно линеаризовать в дискретных интервалах температуры, выбирая величину рабочего напряжения 10, 20, 30, 50, 65 В (прямоугольные импульсы). Соответствующие линейности диапазон температур ΔT , чувствительность df/dT и генерируемые частоты Δf сигнала имеют следующие значения. При 10 В диапазон $\Delta T=77-189\text{ K}$, $df/dT=10700\text{ Гц/К}$, $\Delta f=1900-700\text{ Гц}$. При 20 В диапазон $\Delta T=189-253\text{ K}$, $df/dT=14800\text{ Гц/К}$, $\Delta f=1250-300\text{ Гц}$. При 30 В диапазон $\Delta T=253-273\text{ K}$, $df/dT=6200\text{ Гц/К}$, $\Delta f=425-300\text{ Гц}$. При 50 В диапазон $\Delta T=253-298\text{ K}$, $df/dT=5500\text{ Гц/К}$, $\Delta f=550-300\text{ Гц}$. При 65 В диапазон $\Delta T=263-335\text{ K}$, $df/dT=3100\text{ Гц/К}$, $\Delta f=425-200\text{ Гц}$.

Датчики второй группы работоспособны в интервале температур 203-343 К, выходная характеристика нелинейная, а чувствительность лежит в интервале 1000–6500 Гц/К. В качестве питания датчика используются прямоугольные импульсы напряжения 40–60 В.

Датчики третьей группы работоспособны в интервале температур 243-353 К, выходная характеристика нелинейная, а чувствительность лежит в интервале 5-1000 и 50-100 Гц/К для разных датчиков. Напряжение питания постоянное 10-20 В.

Датчики четвертой группы работоспособны в интервале температур 273-323 К, выходная характеристика нелинейная, а чувствительность лежит в интервале 620-260 Гц/К. Питание от генератора с частотой в области резонансных частот кварца.

Датчики пятой группы работоспособны в интервале температур 273-323 К, выходная характеристика нелинейная, а чувствительность составляет 25 Гц/Ом.

Из анализа представленных данных следует, что датчик на основе кремниевого осциллятора превосходит существующие аналоги по основным характеристикам: чувствительности и ширине рабочего диапазона температур. Кроме того, он превосходит ближайший аналог, германиевый осцилляторный датчик, по наличию в кремниевом датчике линейных участков и по стабильности выходной характеристики, которая в германиевом датчике значительно изменяется во время эксплуатации из-за изменения свойств поверхности германиевого кристалла.

Меры защиты поверхности германия ненадежны или сложны и затратны, тогда как в кремнии поверхность стабилизируется естественным образом за счет быстрого наращивания окисла кремния, к тому же для кремния давно отработаны надежные методы наращивания искусственной пленки двуоксида кремния.

Еще одним технологическим достоинством является относительная простота и дешевизна, характерные для технологии изготовления как кремниевого осцилляторного датчика, так и германиевого.

Кроме информационного поиска был проведен патентный поиск по следующим патентным базам: 1) База данных Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Российской Федерации; 2) Бюро по патентам и товарным знакам США; 3) Европейское патентное бюро. Патентный поиск выявил некоторые разработки, входящие в указанные выше три группы классификации датчиков с частотным выходом.

Для анализа были отобраны 3 российских патента и 2 патента США. Только одна российская заявка патентует разработку, в которой физическое явление (осцилляторный эффект в кремнии) используется для прямого преобразования температуры в частоту – это рассмотренный выше кремниевый осцилляторный датчик. Остальные патенты основаны на использовании схемных решений, преобразующих в частоту сигнал аналогового датчика (терморезистора или конденсатора). Отмеченная патентная разработка кремниевого осцилляторного датчика не использует схемных решений, чем выгодно отличается от аналогичных по назначению разработок и обладает конкурентоспособностью и высоким потенциалом коммерциализации.

Особенностью рассматриваемых осцилляторных датчиков является то, что для их работы необходимо магнитное поле, которое создается малогабаритными постоянными магнитами, при этом в магнитном зазоре можно разместить несколько кремниевых осцилляторных структур для расширения функциональных возможностей устройства, поскольку их габариты не превышают миллиметра.

В заключение следует отметить, что при всех выявленных и отмеченных достоинствах и преимуществах кремниевый осцилляторный датчик может использоваться для решения широкого спектра практических задач: для систем мониторинга температуры почвы в теплицах, для океанических систем мониторинга температуры, для систем мониторинга температуры в нефтегазодобыче и в других подобных задачах. Габариты кремниевого осцилляторного датчика не превышают габаритов датчиков на основе термопар, термосопротивлений и пьезокварца.

Ю. И. Егошин, Д. А. Борейко, Т. С. Тимошенко

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ГИБРИДНЫЕ СВЧ ФИЛЬТРЫ

Аннотация. Предложен вариант реализации интегрального фильтра, выполненного по технологии низкотемпературной совместно обжигаемой керамики с последующим напылением тонких пленок для формирования конденсаторов с уменьшенной площадью. Такая конструкция одновременно имеет миниатюрные габаритные размеры, высокую механическую прочность и контактные площадки для монтажа. Получены частотные характеристики фильтра, и проведен их анализ.

Ключевые слова: LTCC, тонкие пленки, СВЧ-диапазон, гибридные фильтры.

Для цитирования: Егошин Ю. И., Борейко Д. А., Тимошенко Т. С. Малогабаритные гибридные СВЧ фильтры // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7-8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 230–232.

Y. I. Egoshin, D. A. Boreyko, T. S. Timoshenko

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

SMALL-SIZED HYBRID MICROWAVE FILTERS

Abstract. The report suggests an implementation option for an integral filter made using the technology of low-temperature co-fired ceramics followed by spraying thin films to form capacitors with a reduced area. Such a structure simultaneously has miniature overall dimensions, high mechanical strength and contact pads for installation. The frequency characteristics of the filter are obtained and analyzed.

Keywords: LTCC, thin films, microwave band, hybrid filters.

For citation: Egoshin Y. I., Boreyko D. A., Timoshenko T. S. Small-sized hybrid microwave filters // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 230–232.

В работе рассматривается вариант реализации гибридного высокочастотного интегрального фильтра, объединяющий применение технологии керамики с низкой температурой обжига и прецизионной фотолитографии для формирования тонких пленок. Данная конструкция имеет все преимущества толстопленочного исполнения, а также позволяет устранить такие недостатки тонкопленочных фильтров, как низкая добротность катушек индуктивности и отсутствие торцевых контактных площадок для монтажа изделия.

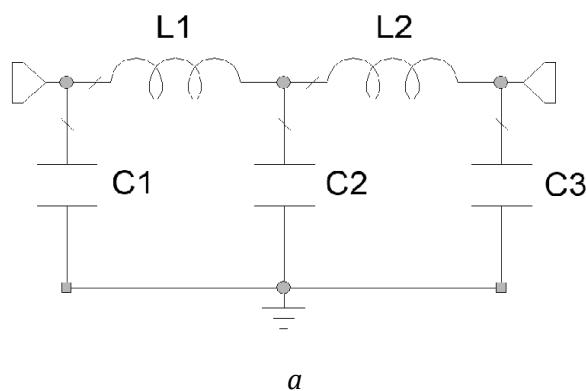
Цель работы – уменьшение габаритных размеров интегральных керамических высокочастотных фильтров и улучшение электрических параметров за счет применения гибридной технологии.

Известны конструкции фильтров, выполненных по тонкопленочной и толстопленочной технологиям. Тонкопленочный фильтр, рассматриваемый в работе, обладает габаритными размерами порядка 2,5х2,0 мм, однако малая добротность катушек индуктивности (порядка 20) и высокая диэлектрическая проницаемость ($\epsilon=14$) тонкопленочного диэлектрического материала не позволяют создавать устройства с рабочей частотой более 2,5 ГГц, а также полосно-пропускающие фильтры с не большими вносимыми потерями.

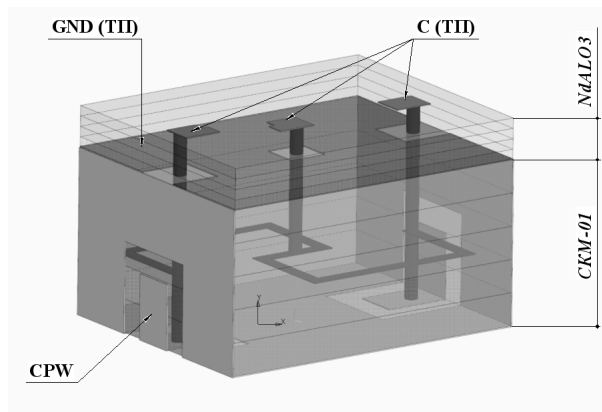
Толсто пленочный фильтр имеет большие габаритные размеры по сравнению с тонкопленочными фильтрами (5х3 мм) за счет достаточно низкой диэлектрической проницаемости ($\epsilon=7,2$), при этом добротность катушек индуктивности в несколько раз выше (порядка 70), в следствие чего вносимые потери в фильтрах могут быть уменьшены. Кроме того, сама конструкция толсто пленочного фильтра, выполненного на низкотемпературной керамике, обладает высокой механической прочностью, а контактные площадки для поверхностного монтажа выполняются в едином цикле с фильтром.

Сохранить преимущества данных технологий и устранить их недостатки возможно за счет применения гибридной технологии при проектировании интегральных фильтров. Такие фильтры будут обладать малыми габаритными размерами, так как конденсаторы будут выполнены из диэлектрического материала с высокой ϵ , однако с ростом частоты габаритные размеры самого фильтра не будут уменьшаться так быстро (относительно тонкопленочных фильтров) за счет того, что в качестве материала подложки будет использована низкотемпературная керамика с меньшей диэлектрической проницаемостью. Такой подход позволит расширить диапазон рабочих частот разрабатываемых фильтров до 10 ГГц. При этом такие фильтры будут обладать малыми вносимыми потерями в полосе пропускания за счет интеграции катушек индуктивности в низкотемпературную керамику.

В качестве примера была рассчитана схема ФНЧ 5 порядка с П-образными звеньями с частотой среза 8500 МГц (рис. 1а). Она включает в себя три конденсатора и две катушки индуктивности. На основе данной схемы была разработана конструкция интегрального фильтра, реализованного по гибридной технологии (рис. 1б). Она состоит из 5 слоев керамики СКМ-01 (толщина 0,1 мм, $\epsilon=7,2$) и 4 слоев тонких пленок моноалюмината неодима NdAlO₃ (толщина 0,002 мм, $\epsilon=14$).



а



б

Рис. 1: а) схема ФНЧ; б) конструкция гибридного интегрального фильтра

Как показано на рисунке, индуктивность размещена на керамических слоях, в то время как конденсаторы выполнены на тонких пленках, сформированных на внешней поверхности керамической подложки. Емкостные элементы занимают малую площадь – 0,3х0,25 мм. Общие габаритные размеры фильтра – 2,5х2,0х0,4 мм. Для обеспечения согласования фильтра на входное сопротивление 50 Ом контактные площадки выполнены в виде компланарной линии.

Для тонкопленочного, толстопленочного и гибридного вариантов реализации фильтра были созданы электромагнитные модели, проведен их анализ. На рис. 2 приведены электрические параметры данных моделей.

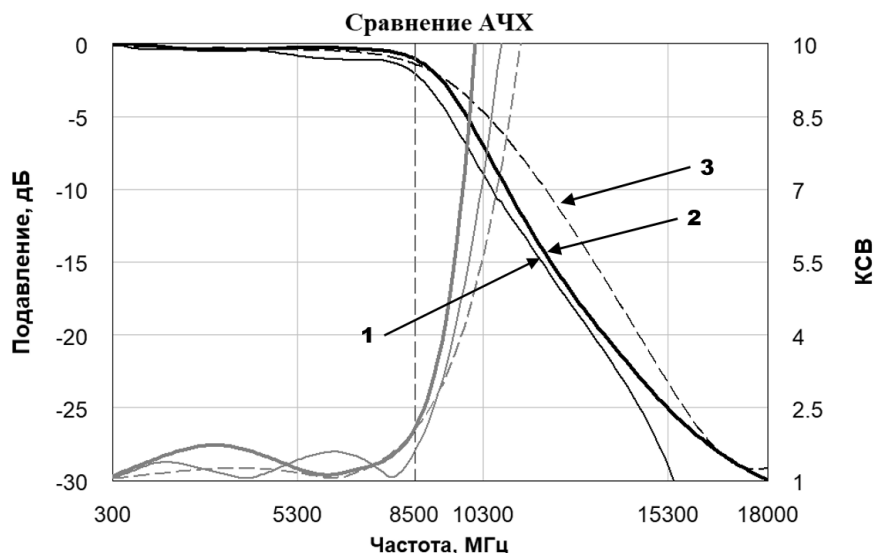


Рис. 2. Электрические параметры рассматриваемых фильтров: толстопленочный (1), гибридный (2), тонкопленочный (3)

Как видно из рис. 2, в диапазоне до 18 ГГц все фильтры имеют практически идентичные параметры, однако низкая добротность тонкопленочных катушек индуктивности влияет не только на вносимые потери в полосе пропускания фильтра, но и на крутизну амплитудно-частотной характеристики. Анализ приведенных конструкций и электрических параметров электромагнитных моделей показал, что гибридный фильтр имеет меньшие габаритные размеры и вносимое затухание по сравнению с керамическим фильтром, а также большее относительное затухание за полосой пропускания по отношению к тонкопленочному фильтру при габаритных размерах 2,5х2,0х0,4 мм.

В ходе данной работы был предложен подход к проектированию интегральных фильтров. Данные, полученные путем электромагнитного моделирования, показали, что гибридная технология может быть применена для реализации интегральных высокочастотных фильтров, при сохранении преимуществ как тонкопленочной, так и толстопленочной технологии.

С. В. Ермоленко^{1,2}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская Федерация

²Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

ПРОБЛЕМЫ МИНИАТЮРИЗАЦИИ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ-ТЕРМОСТАТОВ

Аннотация. В настоящее время необходимы миниатюрные высокостабильные кварцевые генераторы для применения их в беспилотных летательных аппаратах для автономных навигационных систем. Стандартные термокомпенсированные генераторы в данном случае уступают, так как имеют недостаточную стабильность. От стабильности частоты генератора напрямую зависит точность ориентирования в пространстве и выведения аппарата на цель.

Ключевые слова: миниатюрный кварцевый генератор-термостат, миниатюрный кварцевый резонатор-термостат, геттер.

Для цитирования: Ермоленко С. В. Проблемы миниатюризации кварцевых резонаторов-термостатов // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 233–235.

S. V. Ermolenko^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

PROBLEM WITH MINIATURIZATION OF QUARTZ RESONATORS IN THERMOSTATS

Abstract. Currently, there is a need for miniature, highly stable quartz oscillators for use in unmanned aerial vehicles for autonomous navigation systems. Standard thermally compensated oscillators are not suitable for this purpose due to their lack of stability. The accuracy of spatial orientation and target acquisition directly depends on the frequency stability of the oscillator.

Keywords: miniature oscillator thermostat, miniature quartz resonator, getter.

For citation: Ermolenko S. V. Problem with miniaturization of quartz resonators in thermostats // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 233–235.

В современной электронике изделия пьезотехники сильно отстают в миниатюризации. В настоящее время выпускаются кварцевые резонаторы в корпусах 0,8x1,2 мм. Генераторы со стабильностью частоты порядка 10^{-7} в год имеют внушительные размеры порядка 5 см³, существуют более малогабаритные генераторы, например, М32019 АО «ОНИИП» при той же стабильности имеет габариты порядка 2 см³.

Проблема миниатюризации высокостабильных кварцевых генераторов является важной, так как развитие беспилотной авиации требует размещения на борту летательных аппаратов высокостабильных генераторов для навигационных автономных систем, на тот случай если будет потеря связи с навигационным спутником. Существует целый класс МЭМС генераторов, но их стабильность ниже, чем у кварцевых резонаторов-термостатов. Отсутствие миниатюрных кварцевых резонаторов-термостатов не позволяет создавать миниатюрные термостатированные генераторы. Расположение кварцевого пьезоэлемента вместе с элементами термостатирования и генератора в одном корпусе позволяет существенно снизить габариты, такое конструкторское решение применили

в прецизионном кварцевом генераторе М32019. У данного генератора имеется существенный недостаток – срок его службы всего 5 лет. Это связано с тем, что в конструкции имеются электронные компоненты с кадмием, который выделяется в вакуумный объём и оседает на электроде, тем самым уводя частоту генератора, а также со сложностью технологического процесса.

Потребность в высокостабильных генераторах-термостатах на частоты выше 100 МГц большая, также имеется потребность в малогабаритных кварцевых генераторах-термостатах. В литературе описывается процесс создания миниатюрного резонатора-термостата на частоту 200 МГц. В качестве корпуса использован метало-керамический корпус. А выбор корпуса для подобных изделий становится очень важным моментом, так как необходимо гарантировать сохранение достаточного уровня вакуума внутри изделия, вакуум является основным тепловым изолятором для обеспечения устойчивости генератора к изменениям температуры и обеспечения малого потребления мощности в установившемся режиме.

Для упрощения конструкции и технологии изготовления миниатюрных кварцевых генераторов-термостатов необходимо отдельно изготовить резонатор-термостат в металлокерамическом корпусе с минимальным количеством элементов. Для начала необходимо разместить в миниатюрный корпус пьезоэлемент с системой подогрева и контроля температуры.

Если использовать как прототип конструкцию М32019, то необходимо изготовить пирог, состоящий из платы 1 с системой терморегулирования, состоящей из нагревателя 2 и датчика температуры 5 и пьезоэлемента 4, размещённого на ней (рис. 1). Для уменьшения влияния термических расширений платы и кварца пьезоэлемент должен иметь консольное крепление. Либо пьезоэлемент должен иметь вид обратной мезоструктуры, тем самым напряжения будут распределяться по более жёсткой области вокруг мембраны. Размещение нагревателей на пьезоэлементе затруднено, так как они негативно будут влиять на зону колебаний. Если же использовать пьезоэлемент в виде обратной мезоструктуры, то нагреватель можно нанести на периферии, тем самым будет сглаживаться интенсивный поток тепловой энергии в момент включения нагревателя.

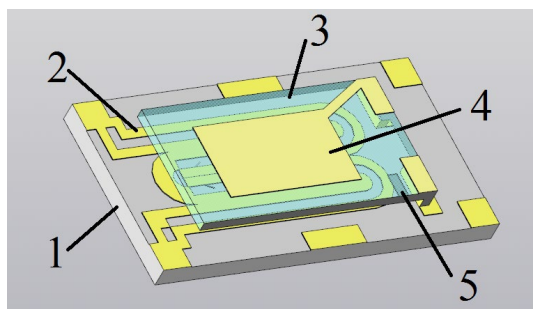


Рис. 1. Схематичное изображение внутреннего устройства кварцевого резонатора-термостата в виде слоёного пирога (без корпуса)

На рис. 2 представлен пример внутреннего устройства кварцевого резонатора-термостата. На пьезоэлементе 5 изготовлена обратная мезоструктура 3 и нанесены нагреватели 2 и электроды 4, а также датчик температуры 1. Данный блок помещается в керамический корпус на теплоизолирующие электропроводящие держатели для обеспечения хорошего электрического контакта между контактными площадками пьезоэлектрического блока и выводами корпуса, а также минимального оттока тела с блока. Данная конструкция наиболее подходящая для создания миниатюрных кварцевых резонаторов-термостатов с высокой долговременной стабильностью, так как во внутреннем объёме квар-

цевого резонатора-термостата нет излишних компонентов термостата, а только нагреватель и терморезистор, тем самым обеспечивается вакуумная гигиена, что немаловажно для стабильности частоты в большом промежутке времени.

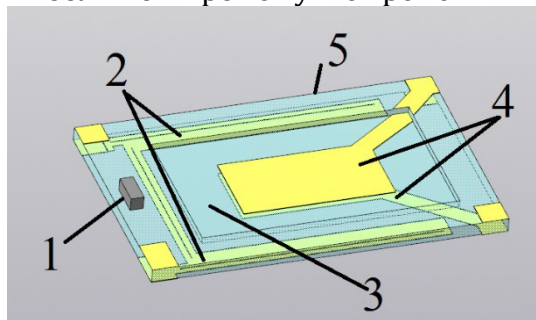


Рис. 2. Схематичное изображение внутреннего устройства кварцевого резонатора-термостата в виде моноблока (без корпуса)

Ещё одной проблемой при изготовлении кварцевых резонаторов-термостатов является поддержание высокого вакуума во внутреннем объёме резонатора-термостата. Для поддержания высокого уровня вакуума в МЭМС резонаторах на протяжении длительного времени применяют геттеры.

Температура активации геттеров находится выше 400 °С, что неприемлемо для некоторых материалов, применяемых в кварцевом резонаторе-термостате, таких как эпоксидные клеи и мягкие припои. Существует ряд конструкторских решений для преодоления данного температурного барьера, одно из них широко применяется при изготовлении МЭМС структур, когда геттер располагают отдельно на крышке, которая подвергается нагреву до температуры его активации, при этом сама МЭМС структура подвергается более низким температурам, и они расположены в одной вакуумной камере, т.е. используется двузонная печь. После процесса отжига и активации геттера происходит герметизация МЭМС структуры. Герметизация может происходить сваркой, приклейкой или пайкой, всё зависит от корпуса, а также используемого оборудования. Оборудование также вносит свой вклад в состав остаточных газов, если в вакуумной камере расположены сложные направляющие манипуляторы, которые необходимо обрабатывать смазками с низким давлением паров, но пары смазок будут присутствовать в остаточных газах и внутри герметизируемого изделия. При герметизации пайкой используют флюсы газообразные (форм газ) или аэрозольные (муравьиная кислота с газом-носителем, аргон или азот). Данные флюсы активно взаимодействуют с элементами конструкции изделий микроэлектроники, в том числе корпусом, и остаются в герметизированном объёме, причём часть флюсов поглотится геттером, а часть – элементами конструкции изделия микроэлектроники и будет медленно влиять на процессы, протекающие в герметизированном корпусе.

Предложенные конструкции миниатюрных кварцевых резонаторов-термостатов могут быть изготовлены на существующем оборудовании, но вопрос поддержания высокого вакуума во внутреннем объёме кварцевых резонаторов пока довольно сложный, так как требуются миниатюрные геттеры. В настоящее время ведутся разработки плёночных геттеров для МЭМС резонаторов, но температура их активации по-прежнему высокая, так как МЭМС структуры можно обрабатывать до 600 °С.

И. В. Забегайло, А. Н. Яковлев

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА ПЕРЕСТРОЙКИ ПОЛОСОВЫХ LC-ФИЛЬТРОВ

Аннотация. Представлены результаты исследования возможности расширения диапазона перестройки полосовых LC-фильтров. Установлено, что одной из причин ограничения диапазона перестройки является изменение модуля входного сопротивления. Показано, что использование согласующих звеньев, представляющих собой ФНЧ с регулируемой частотой среза, позволяет увеличить диапазон перестройки.

Ключевые слова: перестраиваемый LC-фильтр, диапазон перестройки, согласующее звено, характеристическое сопротивление.

Для цитирования: Забегайло И. В., Яковлев А. Н. Расширение диапазона перестройки полосовых LC-фильтров // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 236–238.

I. V. Zabegaylo, A. N. Yakovlev

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

EXPANSION OF THE TUNING RANGE OF BANDPASS LC FILTERS

Abstract. The paper presents the results of the study of the possibility of expanding the tuning range of bandpass LC filters. It was found that one of the reasons for limiting the tuning range is a change in the module of the input resistance. It is shown that the use of matching links, which are low-pass filters with an adjustable cutoff frequency, can increase the tuning range.

Keywords: tunable LC filter, tuning range, matching section, characteristic impedance.

For citation: Zabegaylo I. V., Yakovlev A. N. Expansion of the tuning range of bandpass LC filters // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 236–238.

В помехозащищенных системах связи с перестройкой по частоте в качестве частотно-избирательных цепей находят широкое применение перестраиваемые полосовые LC-фильтры. Избирательность, величина вносимых потерь и уровень нелинейных искажений устройств частотной селекции в значительной степени определяют ряд важнейших характеристик радиотехнических средств, прежде всего таких как помехозащищенность, чувствительность и динамический диапазон. Поэтому тенденции, связанные с дальнейшим повышением технических характеристик радиоэлектронной аппаратуры, предполагают улучшение параметров частотно-избирательных устройств. В перестраиваемых фильтрах наряду с указанными выше параметрами требуется расширение диапазона перестройки по частоте.

Полосовые LC-фильтры могут быть выполнены как с постоянной относительной полосой пропускания, так и абсолютной. Наибольший практический интерес представляют схемы фильтров, реализующие постоянную относительную полосу пропускания, содержащие минимальное число элементов, перестройка которых осуществляется за счет изменения емкости. Одна из таких схем изображена на рис. 1а. Рассчитанная зависимость модуля передаточной функции этого фильтра при его перестройке по частоте приведена сплошной линией на рис. 1б. Как следует из рис. 1б, диапазон перестройки по частоте рассматриваемого фильтра не превышает 3,0...3,5 единиц. При перестройке в более широком диапазоне частот происходит увеличение неравномерности в полосе

пропускания АЧХ фильтра.

Исследования показали, что одной из причин, приводящих к росту неравномерности АЧХ в полосе пропускания, является увеличение модуля входного сопротивления фильтра при его перестройке вверх по частоте. На рис. 1б пунктирными линиями изображены рассчитанные графики зависимости модуля входного сопротивления фильтра при его перестройке. Как видно из представленных результатов, при перестройке от 10 до 90 МГц модуль входного сопротивления на частоте настройки изменяется от 50 до 260 Ом. Это приводит к рассогласованию и, как следствие – к деформации АЧХ и ограничению диапазона перестройки.

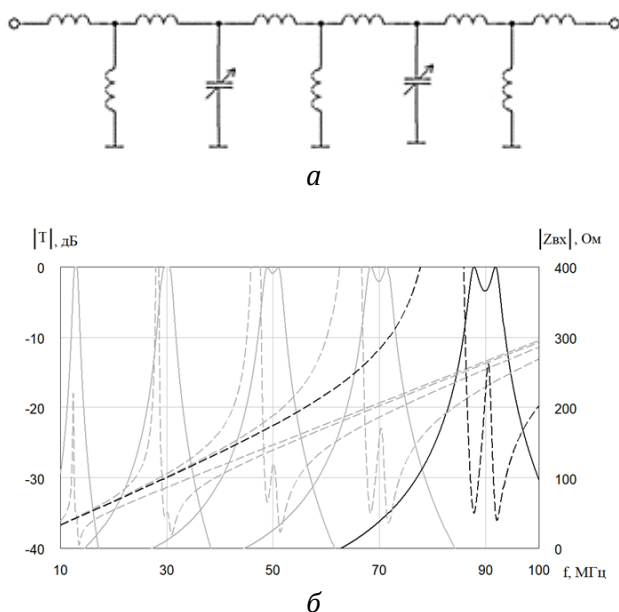


Рис. 1: а) схема полосового перестраиваемого LC-фильтра;
б) АЧХ (сплошная линия) и модуль входного сопротивления (пунктирная линия) фильтра при его перестройке по частоте

Рассмотрим возможность обеспечения работы фильтра, схема которого приведена на рис. 1а, в согласованном режиме при его перестройке по частоте. Для согласования частотно-избирательных цепей на заданное сопротивление могут быть использованы согласующие звенья, представляющие собой ФНЧ (рис. 2а). Действительно, характеристическое сопротивление такого звена со стороны входа Z_T по мере приближения к частоте среза ФНЧ убывает, а характеристическое сопротивление со стороны выхода Z_P – возрастает (рис. 2б). Следовательно, при определенных значениях элементов согласующего звена, можно в пределах его полосы пропускания обеспечить необходимый коэффициент трансформации на частоте настройки перестраиваемого фильтра.

Таким образом, использование в качестве согласующих звеньев ФНЧ с регулируемой частотой среза позволяет обеспечить согласование полосового перестраиваемого LC-фильтра. Для расчета значений элементов согласующего звена нужно определить характеристическое сопротивление полосового LC-фильтра на верхней границе диапазона перестройки, выразить характеристические сопротивления согласующего звена Z_T и Z_P через элементы схемы и, решая систему уравнений, определить их значения.

На рис. 3а изображена схема полосового перестраиваемого LC-фильтра, выполненного подобным образом. Расчет модуля передаточной функции и модуля входного сопротивления, результаты которого приведены на рис. 3б сплошной и пунктирными линиями соответственно, показал, что при перестройке модуль входного сопротивления такого фильтра на частоте настройки будет равен сопротивлению нагрузки, в данном

случае 50 Ом, а АЧХ фильтра при этом не деформируется.



Рис. 2: а) схема согласующего звена, выполненного на основе ФНЧ; б) характеристические сопротивления согласующего окончания

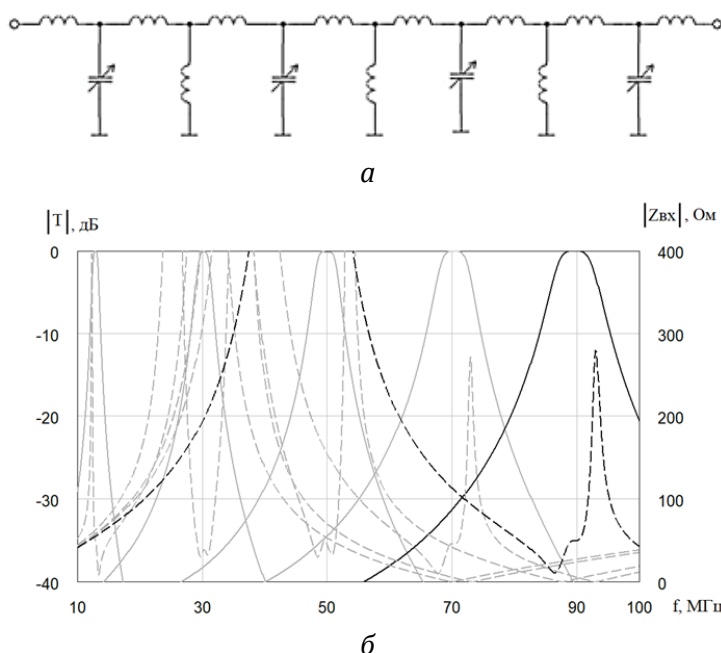


Рис. 3: а) схема полосового перестраиваемого LC-фильтра с согласующими окончаниями; б) АЧХ (сплошная линия) и модуль входного сопротивления (пунктирная линия) фильтра при его перестройке по частоте

Анализ рис. 1 и 3 показывает, что введение в схему перестраиваемого полосового LC-фильтра согласующих звеньев, выполненных в виде ФНЧ с регулируемой частотой среза, позволяет обеспечить согласование фильтра с нагрузкой при его перестройке и тем самым, увеличить диапазон перестройки не менее, чем в 3 раза. Теоретически диапазон перестройки рассматриваемого полосового LC-фильтра ограничивается только физической реализуемостью значений элементов схем. Однако на практике наряду с вопросами работы перестраиваемого фильтра на заданную нагрузку необходимо учитывать и влияние не идеальности элементов схем. Так в проводимых выше расчетах элементы схем предполагались идеализированными, т.е. не имеющими потерь и собственных реактивностей. Вместе с тем, конечная величина добротности и частоты собственного резонанса реальных элементов, прежде всего катушек индуктивности, ведут к отклонению реальных характеристик фильтров от расчетных, накладывая дополнительные ограничения на диапазон перестройки.

В. И. Казаков, В. В. Китаев

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург, Российская Федерация

**МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ
ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
НА БАЗЕ ДИФРАКЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА
С ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ТОПОЛОГИЕЙ РЕШЕТКИ**

Аннотация. Предложена концепция многопараметрической системы спектрального контроля, основанной на применении дифракционного спектрометра с пропускающей многопорядковой решеткой. Проведена оптимизация топологии решетки, целью которой было обеспечение равномерного распределения интенсивности излучения между первым, вторым и третьим дифракционными порядками. Оптимизация осуществлена на основе радиооптической модели, позволившей вычислить коэффициенты Фурье-разложения функции пропускания решетки и определить их влияние на формирование спектра. Разработан алгоритм и реализована программная модель оптимизационного расчета. Полученные результаты подтвердили перспективность создания многоканальных спектрометрических систем, характеризующихся высокой точностью и расширенными функциональными возможностями.

Ключевые слова: спектральный контроль, дифракционный спектрометр, многопорядковая дифракционная решетка, моделирование, автоматизация, спектральный анализ, оптическая система.

Для цитирования: Казаков В. И., Китаев В. В. Многоканальная система контроля физических и технологических процессов на базе дифракционного спектрометра с оптимизированной топологией решетки // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 239–241.

V. I. Kazakov, V. V. Kitaev

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Saint Petersburg, Russian Federation

**MULTICHANNEL SYSTEM FOR MONITORING
PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL PROCESSES
BASED ON A DIFFRACTION SPECTROMETER
WITH OPTIMIZED GRATING TOPOLOGY**

Abstract. The study introduces a concept of a multiparametric spectral monitoring system based on a diffraction spectrometer with a transmission multi-order grating. The topology of the grating was optimized to achieve uniform distribution of radiation intensity among the first, second, and third diffraction orders. The optimization was carried out using a radio-optical model, which enabled the calculation of Fourier series coefficients of the grating transmission function and the assessment of their impact on spectral formation. An optimization algorithm was developed and implemented as a software model. The results confirm the potential for designing multi-channel spectrometric systems distinguished by high measurement accuracy and extended functional capabilities.

Keywords: spectral monitoring, diffraction spectrometer, multi-order diffraction grating, modeling, automation, spectral analysis, optical system.

For citation: Kazakov V. I., Kitaev V. V. Multichannel system for monitoring physical and technological processes based on a diffraction spectrometer with optimized grating topology // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 239–241.

Одновременное использование нескольких оптических каналов с различной разрешающей способностью и диапазоном анализируемых длин волн открывает новые возможности применения спектрометров в системах контроля физических и технологических процессов. Так, один канал может использоваться для спектроскопического анализа элементного состава излучения, а другой – для спектральной пирометрии. В результате один прибор способен выполнять функции многопараметрического измерительного устройства в системах мониторинга. Для этого необходимо изменить топологию дифракционной решетки, чтобы перераспределить дифрагированное излучение между различными порядками дифракции. В качестве примера такой решетки можно привести решение, описанное в работе, где решалась задача повышения эффективности дифракции в определённом, заранее выбранном высшем порядке.

Основой разрабатываемой системы является дифракционный спектрометр с многопорядковой дифракционной решёткой. Такой спектрометр позволяет регистрировать спектры в нескольких дифракционных порядках одновременно, обеспечивая анализ разных участков спектра и повышение точности измерений за счёт многоканального контроля.

По аналогии с рассмотренным в работе решением, в данной работе было произведено моделирование и получены следующие результаты расчетов коэффициентов C_n в зависимости от параметра c для $n = 1, 2, 3$. Результат моделирования коэффициентов разложения C_n в зависимости от ширины штриха c представлен на рис. 1а. Особый интерес представляет участок, где кривые, соответствующие коэффициентам разложения, сходятся в одной точке. Это означает, что при ширине $c=2,85$ (отн. ед.) интенсивность света соответственно в 1, 2 и 3 порядках будет примерно одинаковой. Результат дифракции на такой «многопорядковой» дифракционной решетке, т.е. сформированный комплексный спектр в задней фокальной плоскости линзы представлен на рис. 1б.

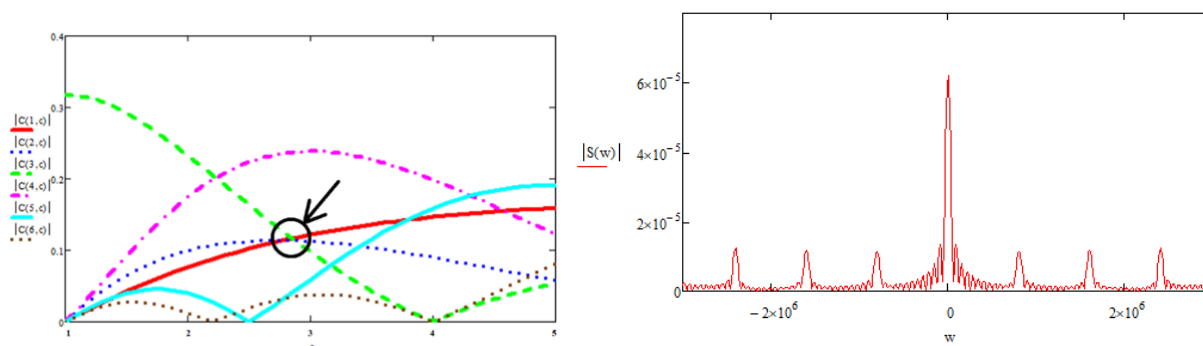


Рис. 1. Результаты математического моделирования топологии решетки:

а) результат компьютерного моделирования коэффициентов разложения $C(n, c)$ (в относительных единицах);

б) распределение интенсивности дифрагированного света на «многопорядковой» решетке

С учётом возможностей многопорядковой дифракционной решётки, рассмотренной выше, можно построить систему контроля и управления физическим процессом, схема которой представлена на рис. 2. Основными компонентами этой системы являются: контролируемый процесс (КП), сопровождающийся оптическим излучением; ВОСП – волоконно-оптическая система передачи излучения; ОС – оптический спектрометр с многопорядковой дифракционной решёткой; РУ – регистрирующие устройства на базе ПЗС-линеек; БО – блок обработки; Y1, Y2, Y3 – информационные параметры КП; УУ – управляющее устройство; X1, X2, X3 – корректирующие параметры.

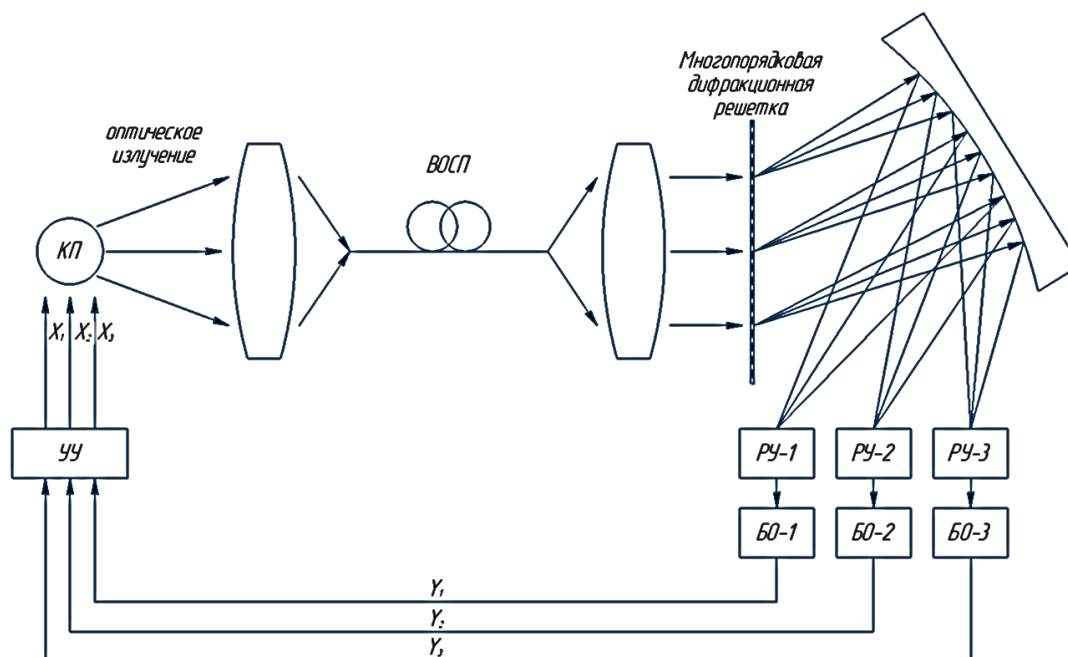


Рис. 2. Функциональная схема системы контроля и управления на базе спектрометра с многопорядковой решеткой

Такая схема позволяет одновременно контролировать несколько параметров процесса и обеспечивать многоканальное управление на основе данных спектрометрии. Информационные параметры $Y_i = y_i(t)$, отражающие состояние управляемого процесса, представляют собой результаты спектроскопических измерений, получаемые с использованием одного спектрального прибора. Применение многопорядковой дифракционной решетки позволяет регистрировать расширенный набор характеристик, различающихся по физической природе.

В. И. Карагусов¹, С. А. Доберштейн^{1,2}, И. В. Веремеев^{1,2}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)

Омск, Российская Федерация

ГЕНЕРАТОР НА ЧАСТОТУ 1000 МГЦ С ДВУХПОРТОВЫМ STW-РЕЗОНАТОРОМ

Аннотация. Представлены результаты исследования малошумящего генератора на частоту 1000 МГц с двухпортовым STW-резонатором на срезе $YX/36^\circ+90^\circ$ кварца. Генератор выполнен по фильтровой схеме из усилителя с обратной связью с эквивалентной линией задержки – двухпортовым резонатором. Добротность такой ЛЗ определяется максимумом группового времени задержки. Топология STW-резонатора оптимизирована по модели матриц смешанных параметров, а схема генератора с помощью компьютерного моделирования по методу анализа АЧХ и ФЧХ разомкнутой петли обратной связи. При добротности двухпортового резонатора $Q = 1600$ получена спектральная плотность мощности шумов -120 дБ/Гц генератора при отстройке от несущей 10 кГц.

Ключевые слова: генератор, двухпортовый резонатор на STW, фазовый шум.

Для цитирования: Карагусов В. И., Доберштейн С. А., Веремеев И. В. Генератор на частоту 1000 МГц с двухпортовым STW-резонатором // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 242–243.

V. I. Karagusov¹, S. A. Doberstein^{1,2}, I. V. Veremeev^{1,2}

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

Omsk, Russian Federation

1000 MHZ OSCILLATOR WITH TWO-PORT STW RESONATOR

Abstract. This paper presents the results of a study of the 1000 MHz low-noise oscillator with a two-port STW resonator on the $36^\circ YX90^\circ$ cut quartz. The oscillator was built as a filter circuit from a feedback amplifier with an equivalent delay line – two-port resonator. The quality factor of this delay line is determined by the group delay time maximum. The STW resonator topology was optimized on the basis of the H-matrix model. The oscillator circuit was optimized by an open-loop frequency and phase response simulation. The noise-power spectral density is -120 dB/Hz at 10 kHz offset from the carrier with the STW resonator quality factor $Q = 1600$.

Keywords: oscillator, two-port STW resonator, phase noise.

For citation: Karagusov V. I., Doberstein S. A., Veremeev I. V. 1000 MHz oscillator with two-port STW resonator // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 242–243.

Поверхностные поперечные волны (Surface Transverse Waves-STW) успешно используются для создания высокочастотных резонаторов и генераторов на их основе. STW на кварце имеет высокую скорость распространения $V=5000$ м/с, поэтому ширина электродов и зазоров встречно-штыревых преобразователей (ВШП) STW-резонатора равна 1,25 мкм для рабочей частоты $f_0=1000$ МГц. Это облегчает технологию изготовления резонаторов и повышает повторяемость их параметров. В работе представлен гене-

ратор на частоту $f_0=1000$ МГц с резонатором на STW. В качестве STW-резонатора используется двухпортовая структура, состоящая из входного и выходного ВШП, размещенных в резонансной полости между двумя отражательными решетками.

STW-резонатор изготовлен на пьезоподложке из кварца среза $YX/36^\circ+90^\circ$, где распространяется STW. Генераторы, построенные на двухпортовых резонаторах, имеют ряд преимуществ по сравнению с генераторами на однопортовых резонаторах по трехточечной схеме. Во-первых, в трехточечной схеме для получения малых фазовых шумов требуются однопортовые резонаторы с достаточно высокой добротностью $Q=8000-9000$ и малыми потерями в последовательной схеме измерения. Во-вторых, для обеспечения баланса амплитуд и фаз на заданной частоте f_0 требуется сложная подстройка за счет выбора соответствующих емкостей в контуре генератора.

Генераторы на двухпортовых резонаторах представляют собой фильтровую схему, состоящую из усилителя, в цепи обратной связи которого включена эквивалентная линия задержки (ЛЗ) -двухпортовый резонатор. Генерация в этой схеме возникает при балансе фаз ($\Delta\varphi=2\pi n$, $n=0, \pm 1, \pm 2$) и балансе амплитуд ($\Delta A \geq 1$), где $\Delta\varphi$ и ΔA – фазовый сдвиг и коэффициент усиления по мощности в кольце автогенератора. Как известно, в фильтровой схеме добротность таких ЛЗ определяется максимумом группового времени задержки, а не вносимыми потерями в последовательной схеме измерения. Поэтому от двухпортового резонатора уже не требуются очень малые вносимые потери. Как показывают данные литературных источников в генераторах на двухпортовых резонаторах для получения малого уровня фазовых шумов можно ограничиться меньшими добротностями, а подстройка на заданную частоту f_0 в полосе пропускания резонатора обеспечивается введением простой фазосдвигающей цепи в контур генератора.

Разработка и оптимизация резонаторов осуществляется с помощью компьютерного моделирования по модели матриц смешанных параметров. Измерение электрических параметров STW-резонаторов проводится на анализаторе цепей «Обзор 304/1» в SMD-корпусах размерами $5 \times 5 \times 1,8$ мм. Образцы резонаторов обеспечивают добротности $Q=1500-1600$, вносимые потери 6-8 дБ, максимальную групповую задержку 500 нс. Отмечается хорошее совпадение между расчетными и измеренными данными. По измеренным данным STW-резонаторов вычисляются эквивалентные параметры: добротность Q , динамическое сопротивление, емкость, индуктивность. Статистическая емкость измеряется на низкой частоте с учетом емкости SMD-корпуса.

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-резонаторов, фазосдвигающих цепей. По результатам моделирования проводятся необходимые корректировки в схеме генератора. Представлены результаты моделирования и экспериментальные данные макета генератора на частоту $f_0=1000$ МГц. Генератор с двухпортовым STW-резонатором с добротностью $Q = 1600$ обеспечил уровень спектральной плотности мощности шумов -120 дБ/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц. Относительное изменение центральной частоты f_0 в диапазоне температур от -60°C до $+85^\circ\text{C}$ составляет не более $-350 \cdot 10^{-6}$. Габариты макета генератора не превышают $25 \times 15 \times 10$ мм.

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

Н. В. Кобылянский¹, С. А. Доберштейн^{1,2}, И. В. Хоменко³

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)

Омск, Российская Федерация

³Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

МАЛОШУМЯЩИЙ ГЕНЕРАТОР НА ЧАСТОТУ 1000 МГц С ОДНОПОРТОВЫМ РЕЗОНАТОРОМ НА STW

Аннотация. Представлены результаты исследования малошумящего генератора на частоту 1000 МГц с однопортовым STW-резонатором на срезе YX/36°+90° кварца. Топология STW-резонатора оптимизирована по модели матриц смешанных параметров, а схема генератора с помощью компьютерного моделирования по методу анализа АЧХ и ФЧХ разомкнутой петли обратной связи. При добротности резонатора $Q = 4452$ получена спектральная плотность мощности шумов -120 дБ/Гц генератора при отстройке от несущей 10 кГц.

Ключевые слова: генератор, однопортовый резонатор на STW, фазовый шум, емкостная трехточка.

Для цитирования: Кобылянский Н. В., Доберштейн С. А., Хоменко И. В. Малошумящий генератор на частоту 1000 МГц с однопортовым резонатором на STW // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 244–245.

N. V. Kobylyansky¹, S. A. Doberstein^{1,2}, I. V. Khomenko³

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

Omsk, Russian Federation

³Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

1000 MHz LOW-NOISE OSCILLATOR WITH SINGLE-PORT STW RESONATOR

Abstract. This paper presents the results of a study of the 1000 MHz low-noise oscillator with a single-port STW resonator on the 36°YX90° cut quartz. The STW resonator topology was optimized on the basis of the H-matrix model. The oscillator circuit was optimized by an open-loop frequency and phase response simulation. The noise-power spectral density is -120 dB/Hz at 10 kHz offset from the carrier with the STW resonator quality factor $Q = 4452$.

Keywords: oscillator, single-port STW resonator, phase noise, Colpitts circuit.

For citation: Kobylyansky N. V., Doberstein S. A., Khomenko I. V. 1000 MHz low-noise oscillator with single-port STW resonator // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 244–245.

Преимущества генераторов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) широко известны: малые габариты, высокая надёжность, высокие рабочие частоты, малые уровни фазовых шумов, высокая температурная стабильность при использовании рэлевской ПАВ на кварце. Однако для создания генераторов на частоту $f_0 = 1000$ МГц требуется резонаторы на ПАВ с шириной электродов и зазоров встречно-штыревого преобра-

зователя (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 маломощный генератор на частоту $f_0 = 1000$ МГц с резонатором на STW. В качестве STW-резонатора используется однопортовая конфигурация, состоящая из ВШП, размещённого в резонансной полости между двумя отражательными решётками. STW-резонатор изготовлен на пьезоподложке из кварца среза $YX/36^\circ+90^\circ$, где распространяется STW со скоростью $V=5000$ м/с. Разработка и оптимизация топологии резонатора осуществляется с помощью компьютерного моделирования по модели матриц смешанных параметров. Измерение электрических параметров STW-резонаторов проводится на анализаторе цепей «Обзор 304/1» в SMD-корпусах 5x5x1,8 мм. Образцы резонаторов обеспечивают добротность $Q = 4452$. Отмечается хорошее совпадение между расчётными и измеренными данными.

По измеренным данным STW-резонаторов вычисляются эквивалентные параметры: добротность Q , динамические сопротивления, ёмкость, индуктивность. Статическая ёмкость измеряется на низкой частоте с учётом ёмкости SMD-корпуса. В качестве схемы генератора использовалась схема Колпитца на биполярном транзисторе – ёмкостная трёхточка. В этой схеме индуктивность заменяется эквивалентной индуктивностью STW-резонатора, при этом рабочая частота генератора будет всегда выше частоты последовательного резонанса (частоты максимума активной проводимости STW-резонатора). Исходя из эквивалентных параметров STW-резонатора, баланса амплитуд и фаз в генераторе определяются элементы схемы генератора: ёмкости конденсаторов в ёмкостной трёхточке, резисторы в коллекторной нагрузке и в цепи эмиттера.

Оптимизация схемы генератора проводится на основе анализа амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазо-частотной характеристики (ФЧХ) разомкнутой петли обратной связи. Критериями генерации на заданной частоте f_0 является усиление по мощности в разомкнутой петле не менее 1 (баланс амплитуд) и сдвиг фаз, кратный 360° (баланс фаз). Моделирование АЧХ и ФЧХ разомкнутой петли обратной связи автогенератора проводится на основе специального программного обеспечения, учитывающего параметры транзистора, эквивалентные параметры STW-резонатора и контурные ёмкости схемы. По результатам моделирования проводятся необходимые корректировки в схеме генератора. Представлены результаты моделирования и экспериментальные данные макета генератора на частоту $f_0=1000$ МГц. В заключении приведены данные по измерению фазовых шумов генератора. Генератор с однопортовым STW-резонатором с добротностью $Q = 4452$ обеспечил уровень спектральной плотности мощности шума -120 дБ/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц. Температурная стабильность генератора определяется температурной стабильностью STW-резонатора, ТКЧ которого равен $-0,043 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}^2$. Относительный уход центральной частоты f_0 в диапазоне температур от -60°C до $+55^\circ\text{C}$ не превышает $-350 \cdot 10^{-6}$, габариты макета генератора составляют 25x15x10 мм.

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

И. А. Корж¹, Б. А. Косарев¹⁻³, М. Н. Туймитова²

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)

Омск, Российская Федерация

³Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ СВЕРХУЗКОПОЛОСНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ПАВ

Аннотация. Приведена методика повышения термостабильности фильтров на ПАВ. Повышение термостабильности достигается за счет использования термомеханических систем, встроенных в корпус фильтра. Такие системы осуществляют изгиб звукопровода фильтра в направлении, противоположном его термическому расширению или сжатию при колебаниях температуры. По результатам экспериментов уход частоты узкополосного фильтра на ПАВ с центральной частотой 70 МГц и полосой пропускания 30 кГц, содержащего термомеханическую систему, составил не более 2 кГц при изменении температуры от – 40 °С до + 80 °С.

Ключевые слова: фильтр на поверхностных акустических волнах, температурно-частотная характеристика, термомеханическая система, стрела прогиба, термостабильность, коэффициент линейного термического расширения.

Для цитирования: Корж И.А., Косарев Б.А., Туймитова М.Н. Способ улучшения термостабильности сверхузкополосных фильтров на ПАВ // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск :ОНИИП, 2025. С. 246–248.

I. A. Korzh¹, B. A. Kosarev¹⁻³, M. N. Tuymitova²

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

Omsk, Russian Federation

³Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

METHOD FOR INCREASING THE THERMAL STABILITY OF ULTRA-NARROWBAND SAW FILTERS

Abstract. The article presents a method for increasing the thermal stability of SAW filters. Thermal stability is increased by using thermomechanical systems built into the filter housing. Such systems bend the filter's sound duct in the direction opposite to its thermal expansion or contraction during temperature fluctuations. According to the results of experiments, the frequency drift of a narrow-band SAW filter with a center frequency of 70 MHz and a passband of 30 kHz, containing a thermomechanical system, was no more than 2 kHz when the temperature changed from - 40 °C to + 80 °C.

Keywords: surface acoustic wave filter, temperature-frequency characteristic, thermomechanical system, bending deflection, thermal stability, coefficient of linear thermal expansion.

For citation: Korzh I. A., Kosarev B. A., Tuymitova M. N. Method for increasing the thermal stability of ultra-narrowband SAW filters // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 246–248.

Введение

В настоящее время фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) широко применяются в радиоэлектронной аппаратуре. Колебания температуры радиоэлектронной аппаратуры в процессе ее эксплуатации или за счет воздействия климатических факторов приводят к смещению частоты фильтров на ПАВ, а значит, к ухудшению соотношения сигнал – шум в информационных каналах. Смещение частоты фильтров на ПАВ происходит за счет термических деформаций пьезоэлектрической подложки и корпуса. Одним из способов решения обозначенной проблемы является использование различных термомеханических систем, позволяющих компенсировать уход частоты фильтра на ПАВ.

Целью работы является разработка термомеханической системы для фильтра на ПАВ, которая обеспечит компенсацию ухода его центральной частоты с учетом температурно-частотной характеристики.

Описание термомеханической системы

В работе предложено два способа такой компенсации, отличительной особенностью которых является учет температурно-частотной характеристики фильтра на ПАВ. Компенсация ухода частоты фильтра на ПАВ осуществляется за счет изгиба пьезоэлектрической подложки. Если у фильтра преобладает уход частоты в области высоких температур, то при повышении температуры термомеханическая система должна изгибать пьезоэлектрическую подложку в направлении посадочного места корпуса. Если у фильтра преобладает уход частоты в области низких температур, то при понижении температуры термомеханическая система должна изгибать пьезоэлектрическую подложку в направлении крышки корпуса.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для получения экспериментальных результатов было изготовлено два узкополосных фильтра на ПАВ: центральная частота 70 МГц; полоса пропускания 30 кГц; материал подложки кварц YXL/33° - среза, корпус типа SMD - DLCC14/10-1. Один из фильтров был изготовлен с использованием стандартной операции монтажа пьезоэлектрической подложки в корпус (рис. 1).

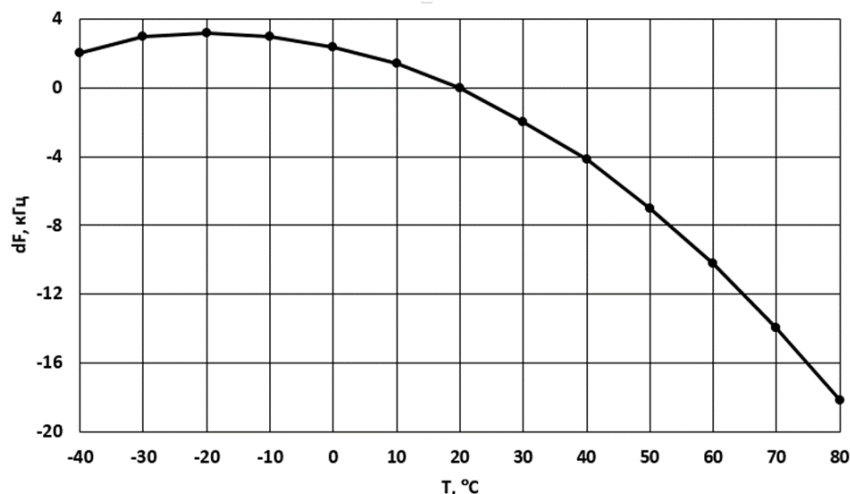


Рис. 1. Частотно-температурная характеристика фильтра на ПАВ без термомеханической системы

Из рис. 1 видно, что уход частоты значительней в положительном диапазоне температур. При изменении температуры от $-40\text{ }^\circ\text{C}$ до $+80\text{ }^\circ\text{C}$ уход частоты составляет около 19 кГц.

В другой фильтр была интегрирована термомеханическая система с изгибом подложки в направлении посадочного места (рис. 2).

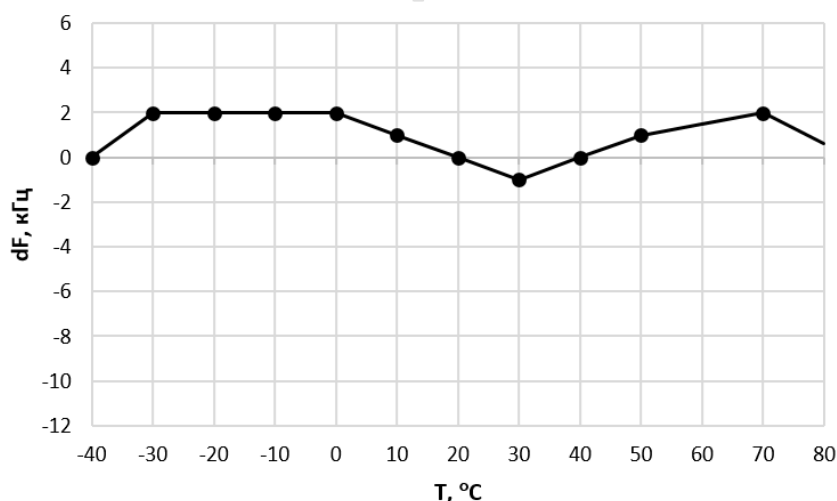


Рис. 2. Частотно-температурная характеристика фильтра на ПАВ с термомеханической системой

Из показанной на рис. 2 зависимости следует, что уход частоты узкополосного фильтра на ПАВ, содержащего термомеханическую систему с изгибом подложки в направлении посадочного места, составляет не более 2 кГц при изменении температуры от -40°C до $+80^\circ\text{C}$.

Из результатов эксперимента следует, что интеграция в фильтр на ПАВ термомеханической системы позволила уменьшить уход центральной частоты с 19 кГц до 2 кГц при изменении температуры от -40°C до $+80^\circ\text{C}$.

Выводы

В работе предложены технические решения для повышения термостабильности фильтра на ПАВ, отличительной особенностью которых является учет температурно-частотной характеристики фильтра. Компенсация ухода частоты фильтра на ПАВ осуществляется за счет изгиба пьезоэлектрической подложки. Если у фильтра преобладает уход частоты в области высоких температур, то при повышении температуры термомеханическая система должна изгибать пьезоэлектрическую подложку в направлении посадочного места корпуса. Если у фильтра преобладает уход частоты в области низких температур, то при понижении температуры термомеханическая система должна изгибать пьезоэлектрическую подложку в направлении крышки корпуса. По результатам экспериментов уход частоты узкополосного фильтра на ПАВ с центральной частотой 70 МГц и полосой пропускания 30 кГц, содержащего термомеханическую систему с изгибом подложки в направлении посадочного места, составил не более 2 кГц при изменении температуры от -40°C до $+80^\circ\text{C}$.

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

Д. Ю. Кропачев, А. Г. Козлов, Д. Г. Лобов, А. Г. Шкаев

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВА МЕТАЛЛОВ ИНФРАКРАСНЫМ СПОСОБОМ

Аннотация. В современной металлургической промышленности большинство технологических процессов требует обеспечения и контроля заданных температурных режимов. В связи с этим особую роль играют точность и скорость температурных измерений в наиболее распространенных процессах выплавки металлов в диапазоне температур 1000...1800°C.

Ключевые слова: абсолютно черное тело, температура расплавов, коэффициент излучательной способности, кварцевый чехол.

Для цитирования: Кропачев Д. Ю., Козлов А. Г., Лобов Д. Г., Шкаев А. Г. Измерения температуры расплава металлов инфракрасным способом // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 249–250.

D. Yu. Kropachev, A. G. Kozlov, D. G. Lobov, A. G. Shkaev

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

MEASURING THE MELTING TEMPERATURE OF METALS BY INFRARED TECHNOLOGY

Abstract. In the modern metallurgical industry, most technological processes require the provision and control of the specified temperature conditions. In this regard, the accuracy and speed of temperature measurements play a special role in the most common metal smelting processes in the temperature range of 1000...1800°C.

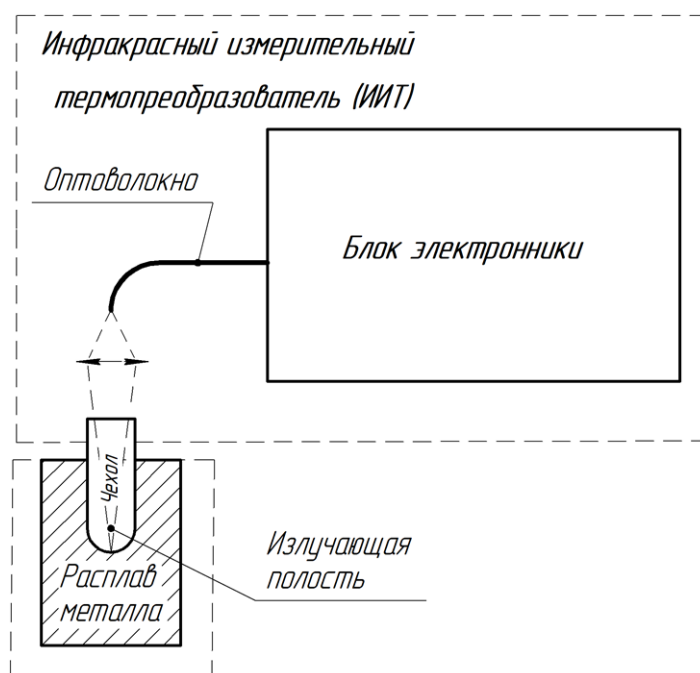
Keywords: blackbody radiation, temperature of melts, emissivity coefficient, quartz cover.

For citation: Kropachev D. Yu., Kozlov A. G., Lobov D. G., Shkaev A. G. Measuring the melting temperature of metals by infrared technology // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 249–250.

В работе представлен новый подход к измерениям температуры расплава металлов. Принципиальным отличием нового метода является то, что в качестве материала чехла предлагается использовать материал, прозрачный в спектральном диапазоне излучений расплавов. При этом сам расплав, излучающий через стенки чехла, будет формировать излучающую полость типа модели АЧТ. При этом для передачи теплового излучения в инфракрасный измерительный термопреобразователь (ИИТ) предлагается использовать специальное оптическое волокно.

Функциональная схема реализации предлагаемого метода представлена на рисунке. Чехол из оптически прозрачного материала помещается в расплав металла. На дно чехла визируется оптическая система ИИТ и далее посредством оптоволокну инфракрасное излучение передается на чувствительный элемент, расположенный в блоке электроники.

Проведены расчеты и экспериментальные результаты по обоснованию спектральных характеристик материалов чехла излучателя модели абсолютно черного тела. Приведены результаты натурных испытаний предлагаемого ИИТ при измерениях температуры расплава металла в индукционных печах с помощью оптически прозрачного чехла.



Функциональная схема реализации метода измерения

В. А. Лойко^{1,2}, Д. О. Даниленко^{1,2}

¹ООО «Радиокомп», Москва, Российская Федерация

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Российская Федерация

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА МОНТАЖА ПАВ-РЕЗОНАТОРА НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ВНЕШНИМ ВИБРАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования влияния способа монтажа ПАВ резонатора на величину деградации фазового шума генератора при воздействии внешней широкополосной случайной вибрации. Проведено сравнение графиков фазового шума генератора с механической системой пассивной виброзащиты и результатов, достигнутых при монтаже резонатора различными способами в генератор без системы виброзащиты. Определен наиболее оптимальный способ монтажа резонатора.

Ключевые слова: ПАВ-резонатор, чувствительность к вибрации, фазовый шум, автогенератор.

Для цитирования: Лойко В. А., Даниленко Д. О. Экспериментальное исследование влияния способа монтажа ПАВ резонатора на чувствительность к внешним вибрационным воздействиям // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 251–253.

V. A. Loyko^{1,2}, D. O. Danilenko^{1,2}

¹LLC "Radiocomp", Moscow, Russian Federation

²National Research University "MPEI", Moscow, Russian Federation

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF THE METHOD OF MOUNTING A SAW RESONATOR ON THE SENSITIVITY TO EXTERNAL VIBRATION EFFECTS

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of the influence of the SAW resonator mounting method on the magnitude of the generator phase noise degradation under the effect of external broadband random vibration. The phase noise graphs of the generator with a mechanical passive vibration protection system are compared with the results achieved when mounting the resonator in different ways in a generator without a vibration protection system. This paper offers the most optimal method for mounting the resonator.

Keywords: SAW resonator, vibration sensitivity, phase noise, self-oscillator.

For citation: Loyko V. A., Danilenko D. O. Experimental study of the influence of the method of mounting a SAW resonator on the sensitivity to external vibration effects // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 251–253.

Наряду с малошумящими генераторами на кварцевых резонаторах малошумящие генераторы с резонаторами на поверхностных акустических волнах (ПАВ) также широко применяются в современных радиотехнических системах, где предъявляются повышенные требования к уровню фазовых шумов (ФШ) формируемых сигналов.

Несмотря на более высокую стабильность частоты генераторов на кварцевых резонаторах по сравнению с генераторами с резонаторами на ПАВ, в СВЧ диапазоне частот последние смотрятся наиболее выигрышно с точки зрения ФШ формируемого сигнала

(на частотах более 1 ГГц и отстройках от несущей частоты более 10 кГц). Однако благодаря тому, что и кварцевые резонаторы, и ПАВ резонаторы (в подавляющем большинстве случаев) выполнены из пластинок кварца, они обладают одинаковой чувствительностью к внешнему воздействию ускорению g , типовое значение которой составляет приблизительно от 1 до 5 ppb/g. Наличие у резонаторов чувствительности к внешнему ускорению приводит к деградации ФШ генераторов, выполненных на их основе. Величина деградации ФШ прямо пропорциональна уровню действующего на резонатор вибрационного ускорения и чувствительности резонатора к вибрации, а диапазон отстроек от несущей частоты в котором наблюдается деградация ФШ соответствует диапазону частот вибрационного воздействия.

С целью уменьшения деградации ФШ маломощных генераторов при внешних вибрационных воздействиях широко применяются различные системы пассивной виброзащиты. В таких системах маломощный генератор подвешивается на силиконовых или тросовых виброизоляторах, которые благодаря наличию собственных диссипативных потерь снижают величину ускорения, действующую непосредственно на резонатор. Однако такие системы виброзащиты, во-первых, приводят к существенному увеличению массогабаритных показателей конечного изделия, а во-вторых, к избыточной деградации ФШ на отстройке от несущей частоты, совпадающей с частотой собственного резонанса механической системы виброзащиты (если она попадает в диапазон частот внешнего вибрационного воздействия). Применение пассивной системы виброзащиты для обеспечения возможности маломощного генератора работать в условиях внешних вибрационных воздействий неизбежно. При этом снижение собственной чувствительности ПАВ резонатора к внешнему ускорению позволит снизить и требования, предъявляемые к такой системе виброзащиты, что приведет к снижению её массогабаритных показателей.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния способа монтажа ПАВ резонатора в генераторе на ФШ формируемого им сигнала в условиях воздействия внешнего вибрационного ускорения.

Для проведения экспериментальных исследований использовался классический рэлеевский двухпортовый ПАВ резонатор собственной разработки, который состоит из крышки с габаритами 13х6х1 мм³ и звукопровода с габаритами 13х8х1 мм³, выполненными из кварцевых пластин. С одной стороны звукопровода расположены металлические встречно-штыревые преобразователи с контактными площадками и отражательные решетки. Сверху звукопровод (со стороны встречно-штыревых преобразователей) накрывается крышкой и оплавляется с помощью специального стеклопорошка.

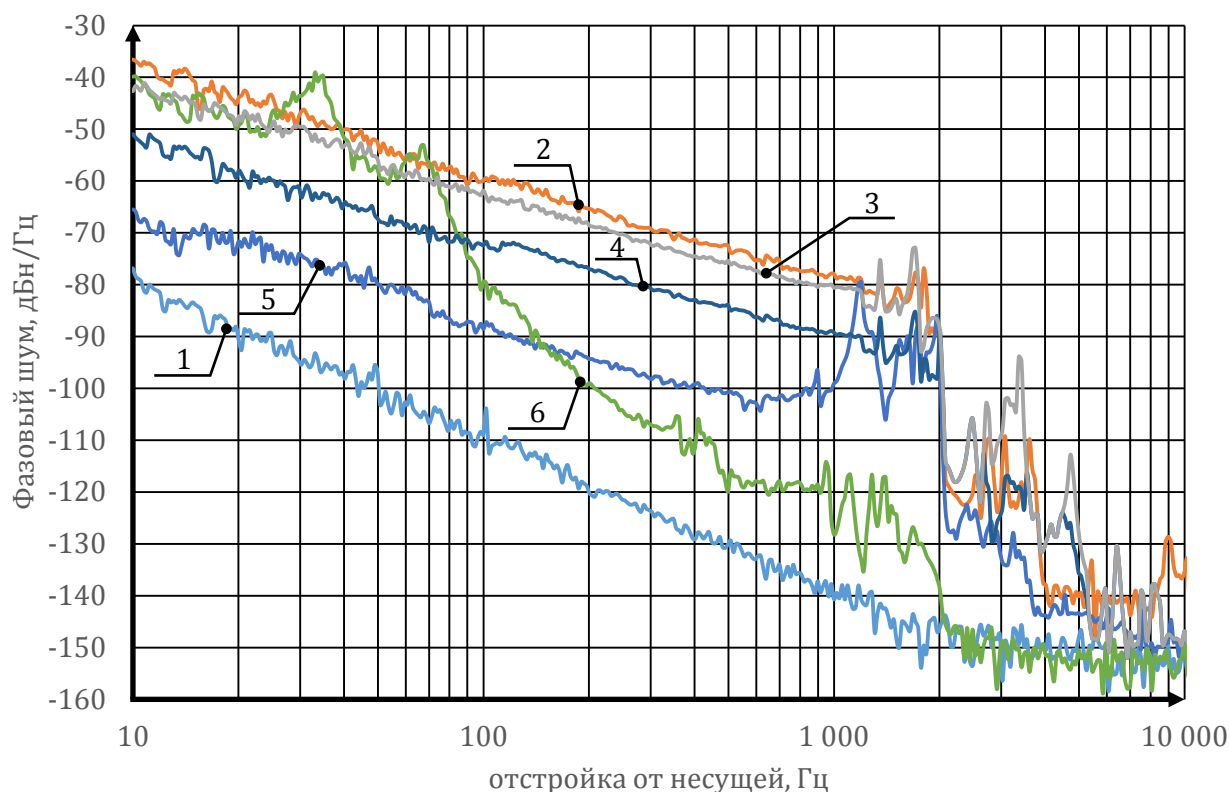
Исследованию влияния способов монтажа ПАВ резонатора на чувствительность к внешнему вибрационному ускорению предшествовало измерение кривых ФШ генератора в нормальных условиях (без внешнего механического воздействия) (кривая 1 на рисунке) и при воздействии широкополосной случайной вибрации в диапазоне частот от 20 Гц до 2 кГц (кривая 2 на рисунке). Сравнивая данные кривые, видно, что деградация фазового шума составляет от 40 до 60 дБ в зависимости от частотной отстройки. При измерении кривых 1 и 2 резонатор приклеивался свободной широкой стороной звукопровода к плате с помощью кремнийорганического герметика ВГО-1, толщина слоя герметика составляла не более 0,1 мм.

Последующие кривые ФШ измерялись для генератора с одним и тем же резонатором, приклеенным на тот же герметик ВГО-1 с такой же толщиной 0,1 мм, при одном и том же уровне внешнего механического воздействия.

На кривой 3 рисунка представлен ФШ генератора, в котором резонатор смонтирован на плату через проставки, предварительно отлитые из ВГО-1 (поперечное сечение

проставок 0,9x0,9 мм, длина 8 мм). Таким образом звукопровод резонатора контактировал через проставки с платой генератора лишь 15% своей поверхности. Такой монтаж позволил снизить деградацию ФШ в среднем на 3,5 дБ.

На кривой 4 рисунка представлен ФШ генератора, в котором резонатор смонтирован «вверх ногами», то есть приклеен свободной широкой стороной крышки. Такой способ монтажа резонатора позволяет снизить деградацию ФШ на 9 дБ.



Графики фазового шума исследуемого ПАВ генератора

На кривой 5 представлен ФШ генератора, в котором резонатор смонтирован «вверх ногами» через проставки из ВГО-1 (поперечное сечение проставок 0,9x0,9 мм, длина 6 мм). Такой способ монтажа резонатора позволил снизить деградацию ФШ более чем на 20 дБ в диапазоне отстроек от несущей частоты вплоть до 1 кГц.

На кривой 6 рисунка представлен ФШ генератора, в котором резонатор смонтирован свободной широкой стороной звукопровода на плату и весь генератор размещён на силиконовых виброизоляторах. В данном случае такой способ позволил получить снижение деградации ФШ на величину более чем 20 дБ на отстройках от несущей частоты от 100 Гц и выше.

Таким образом, в работе показано, что генератор с одним и тем же ПАВ резонатором при одном и том же внешнем механическом воздействии способен демонстрировать более чем на 25-30 дБ меньшую деградацию ФШ при ином способе монтажа резонатора. Данное обстоятельство позволяет существенно ослабить требования, предъявляемые к механической системе виброзащиты, и как следствие минимизировать массогабаритные показатели конечного изделия.

А. А. Мололкин¹, В. Е. Умылин², Б. А. Абдурагимов²

¹АО «Фомос-Материалы», Москва, Российская Федерация

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Москва, Российская Федерация

МОНОКРИСТАЛЛЫ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

Аннотация. Представлены результаты исследований и разработок в области технологии роста пьезоэлектрических кристаллов, а также их последующего промышленного производства. Особое внимание уделено методам изготовления пьезоэлектрических пластин, чувствительных и оптических элементов. Продемонстрированы возможности применения отечественных монокристаллов в передовых областях акустоэлектроники, что открывает новые перспективы для интеграции отечественных технологий в глобальную научно-техническую сферу.

Ключевые слова: кристаллофизика, пьезоэлектрические кристаллы, пьезоэлектрические пластины, чувствительные и оптические элементы, акустоэлектроника, поверхностно-акустические волны.

Для цитирования: Мололкин А. А., Умылин В. Е., Абдурагимов Б. А. Монокристаллы отечественного производства для применения в современных акустоэлектронных устройствах // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 254–256.

A. A. Mololkin¹, V. E. Umylin², B. A. Abduragimov²

¹JSC “Fomos-Materials”, Moscow, Russian Federation

²National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

DOMESTICALLY PRODUCED SINGLE CRYSTALS FOR USE IN MODERN ACOUSTOELECTRONIC DEVICES

Abstract. This paper presents the results of research and development in the field of piezoelectric crystal growth technology, as well as their subsequent industrial production. Particular attention is paid to the methods of manufacturing piezoelectric plates, sensitive and optical elements. The possibilities of using domestic single crystals in advanced areas of acoustoelectronics are demonstrated, which opens up new prospects for the integration of domestic technologies into the global scientific and technical sphere.

Keywords: crystal physics, piezoelectric crystals, piezoelectric plates, sensitive and optical elements, acoustoelectronics, surface acoustic waves.

For citation: Mololkin A. A., Umylin V. E., Abduragimov B. A. Domestically produced single crystals for use in modern acoustoelectronic devices // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 254–256.

Современная акустоэлектроника и пьезотехника являются ключевыми элементами технологической инфраструктуры, обеспечивающими создание высокоточных и надежных устройств для широкого спектра отраслей. Разработка и производство отечественных пьезоэлектрических материалов, приборов и систем, способных конкурировать с зарубежными аналогами по качеству и функциональным характеристикам, явля-

ется стратегически важной задачей, направленной на снижение зависимости от импортных поставок и повышение технологической независимости страны.

Производство синтетических монокристаллов в СССР и России прошло несколько важных этапов. В 1950-60-х годах в СССР началась активная разработка и производство первых синтетических монокристаллов, в частности выращиванием сегнетоэлектрических синтетических монокристаллов, таких как ниобат лития и танталат лития, занимались несколько предприятий, в Тульской области БЗТХИ, в Мурманской области «Северные кристаллы», на Украине город Черкассы, «Импульс». В 1990-х годах после распада СССР отрасль столкнулась с кризисом из-за сокращения заказов и снижения финансирования. АО «ФОМОС-МАТЕРИАЛЫ» в 2016 году провели работы по восстановлению производства монокристаллов ниобата и танталата лития. Необходимость таких работ обусловлена современным состоянием производства материалов для радиоэлектронной промышленности, одной из проблем которого является утрата отечественной промышленностью способности производить синтетические сегнетоэлектрические кристаллы. Вследствие этого предприятия-разработчики изделий пьезотехники и акустоэлектроники вынуждены закупать данные материалы у зарубежных поставщиков.

Компания АО «ФОМОС-МАТЕРИАЛЫ» в настоящее время является единственным в России производителем высококачественных сегнетоэлектрических кристаллов ниобата и танталата лития, пригодных для изготовления пластин диаметром до 4 дюймов. Данные материалы широко используются в разработке и производстве акустоэлектронных устройств, включая широкополосные фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в диапазоне частот от десятков мегагерц до единиц гигагерц. В докладе представлены характеристики пластин ниобата лития различных срезов (64°Y-X , Y-Z , 128°Y-X , 41°Y-X , 36°Y-X), а также проведено сравнительное исследование параметров фильтров на ПАВ, изготовленных на основе стандартных пластин ниобата лития среза 128°Y-X и танталата лития среза $\text{X-}112^\circ\text{Y}$ от АО «Фомос-Материалы» и зарубежных производителей. Также приведены сравнительные характеристики пластин ниобата лития среза X-Y для использования в гироскопах.

Пьезоэлектрические материалы являются основой для создания высокочувствительных элементов в электронной компонентной базе, включая устройства фильтрации и стабилизации частот, датчики давления, вибрации и дозиметры. Разработка и внедрение отечественных технологий в производстве монокристаллов приобретают особую актуальность в условиях политической и экономической нестабильности на мировом рынке акустоэлектроники и пьезотехники.

С 1994 года АО «ФОМОС-МАТЕРИАЛЫ» активно занимается выращиванием и обработкой пьезоэлектрических монокристаллов группы галогерманатов, таких как лангасит, лангатат и катангасит. Кристаллы лангасита впервые были синтезированы в 1980-х годах советскими учеными, включая Б.В. Миля, М.Ф. Дубовика, Г.Д. Мансфельда, И.М. Сильвестрову и Ю.В. Писаревского. В настоящее время материалы семейства лангасита находят широкое применение в российских и зарубежных разработках пьезоэлектрических устройств на поверхностных и объемных акустических волнах (ПАВ и ОАВ), а также в высокотемпературных датчиках вибрации и давления.

Материалы семейства лангасита обладают рядом уникальных преимуществ по сравнению с традиционными материалами пьезокерамикой и кварцем. Они характеризуются высокой термостабильностью пьезоэлектрических свойств, отсутствием пьезоэлектрического эффекта и фазовых переходов до температуры плавления 1470°C . Пластины из лангасита, лангатата и катангасита различных кристаллографических направлений демонстрируют низкую скорость распространения поверхностных акустических волн (~ 2700 м/с), среднее значение коэффициента электромеханической связи (k^2) в диапазоне 0,3–0,4%, а также низкий температурный коэффициент задержки (ТКЗ) $\sim$ -

$(0,067-0,09) \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Эти характеристики делают их особенно эффективными для создания низкочастотных устройств на ПАВ с высокой температурной стабильностью.

В контексте стратегии импортозамещения АО «ФОМОС-МАТЕРИАЛЫ» активно сотрудничает с отечественными производителями акустоэлектронных компонентов, включая датчики, фильтры и резонаторы. На основе кристаллов лангзита разрабатываются датчики динамического давления для измерения быстропеременных (импульсных) давлений в жидких и газообразных средах. Эти датчики могут использоваться как автономно, так и в составе сложных диагностических систем для компрессоров, двигателей, турбин и других промышленных механизмов. Отечественные разработчики предлагают широкий спектр пьезоэлектрических датчиков, включая функциональные аналоги зарубежных моделей от компаний KISTLER и MEGGIT.

Отечественные производители ПАВ фильтры изготавливают фильтры для обработки радиосигналов в диапазоне частот от 10 МГц до 2 ГГц. В последние годы разработаны новые конструкции фильтров на ПАВ, обеспечивающие минимальные вносимые потери на уровне 1–7 дБ, что существенно повышает их эффективность и надежность.

В рамках работы по восстановлению производства выращивания кристаллов ниобата лития компанией ООО «БУТИС» проведено сравнение фильтров, изготовленных на пластинах от компании «ФОМОС-МАТЕРИАЛЫ» и на пластинах от зарубежной компании. Представлены характеристики устройств на объемных акустических волнах (ОАВ) и ПАВ, изготовленных в АО «ОНИИП» на пьезокристаллах производства АО «ФОМОС-МАТЕРИАЛЫ». Представленные высокие характеристики, полученные на указанных пьезокристаллах, свидетельствуют о их высоком качестве, возможности полной замены импортных материалов, да и самих устройств на ОАВ и ПАВ.

Разрабатываемые пьезоэлектрические подложки будут использованы для разработки и производства фильтров и линий задержки на поверхностных акустических волнах (ПАВ), применяемых для замещения на отечественном рынке импортных разработок, а также для разработки новых и модернизации существующих радиоэлектронных систем управления и связи общего и специального назначения, систем радиочастотной идентификации в различных объектах народного хозяйства.

В. В. Поляков

Центральное конструкторское бюро автоматики, Омск, Российская Федерация

ТРАНЗИСТОРНЫЙ СВЧ АВТОГЕНЕРАТОР НА КОПЛАНАРНОЙ СТРУКТУРЕ С ДВУХСТОРОННЕЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ

Аннотация. Представлены результаты проектирования автогенератора на частоте 8 ГГц с использованием элементов отечественного производства и линий с распределенными параметрами. Основное внимание уделено построению малосигнальной модели транзистора, расчёту импедансов нагрузок и учёту паразитных параметров монтажа в двухсторонней копланарной структуре. Особое внимание при расчете уделялось компактности и технологичности изделия.

Ключевые слова: СВЧ, автогенератор, фазовый шум, полевой транзистор, варикап.

Для цитирования: Поляков В. В. Транзисторный СВЧ автогенератор на копланарной структуре с двухсторонней металлизацией // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 257–258.

V. V. Polyakov

Central design bureau of automatics, Omsk, Russian Federation

TRANSISTOR MICROWAVE OSCILLATOR ON COPLANAR STRUCTURE WITH DOUBLE-SIDED METALLIZATION

Abstract. The work presents the results of designing an oscillator at 8GHz using elements of domestic production and lines with distributed parameters. The main focus is on the construction of a low-signal transistor model, calculation of load impedances and consideration of the parasitic mounting parameters in a two-sided coplanar structure. Particular attention was paid to the compactness and manufacturability of the product.

Keywords: microwave, oscillator, phase noise, field effect transistor, varactor.

For citation: Polyakov V. V. Transistor microwave oscillator on a coplanar structure with double-sided metallization // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 257–258.

Современные радиотехнические комплексы требуют применения надежных и стабильных источников сигнала в диапазоне СВЧ. Одним из ключевых узлов является автогенератор, который применяется в контрольных системах. В данной работе представлен результат проектирования и моделирования отечественного автогенератора, работающего на частоте 8 ГГц.

В качестве активного элемента был выбран отечественный маломощный полевой транзистор 3П3107АН5, обладающий граничной частотой более 40 ГГц, что значительно превышает рабочую частоту генератора и обеспечивает надежный запас по усилению. Применение отечественных транзисторов связано как с доступностью элементной базы, так и с необходимостью исключить импортные компоненты.

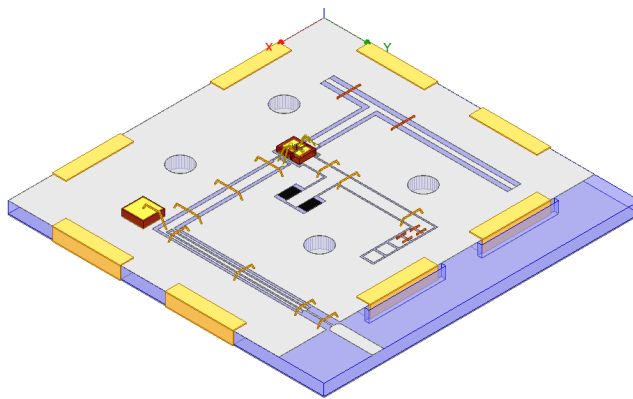
Рабочая точка транзистора определялась на основе вольт-амперных характеристик и данных технических условий. Для этого были рассчитаны номиналы резисторов в цепях стока и истока с учетом обеспечения маломощного режима работы. Данный этап позволил сформировать схему смещения с однополярным питанием, что упростило реализацию конструкции.

Для корректного описания работы транзистора применена малосигнальная модель. На зондовой станции были измерены S -параметры транзистора, после чего проведена оптимизация параметров модели в диапазоне до частот 20 ГГц. Такой подход позволил получить достоверное соответствие модели и реального устройства.

Основное внимание уделено учёту паразитных параметров монтажа. Рассчитана электромагнитная модель посадочного места транзистора на поликоровой плате с двухсторонней копланарной структурой. В отличие от классического одностороннего копланара двухсторонняя реализация имеет сплошную металлизацию земли на нижней стороне поликора. Теоретически двухсторонний копланар сочетает в себе преимущества микрополосковых линий (наличие общей земли снизу) и классических копланаров (удобство согласования и компактность размещения элементов сверху). Благодаря этому достигается более стабильное распределение электромагнитного поля и предсказуемость частотных характеристик.

Импедансные кривые $\text{ReZIN}(f)$ и $\text{ImZIN}(f)$ использовались в качестве условий при проектировании топологии. Для цепи стока реализован фильтрующий участок в виде четвертьволновой линии с шлейфами, предотвращающими проникновение СВЧ-сигнала в цепь питания. Для цепи истока применён напылённый резистор, что позволило избежать индуктивных эффектов, характерных для SMD-элементов на таких частотах. Цепь затвора замыкается на землю через четверть волновую линию.

Одним из ключевых результатов стало создание компактного генератора. Размер платы составил 7×7 мм при минимальной ширине линий 30 мкм (см. рис.). Компактность конструкции не повлияла на стабильность работы: генератор сохраняет заданные параметры по фазовому шуму и уровню выходной мощности. Такой результат особенно важен для современных радиосистем, где требования к миниатюризации ужесточаются.



Топология полученного автогенератора в HFSS

Заключение

В данной работе описан процесс расчёта и моделирование автогенератора на частоту 8 ГГц. Описанный подход может быть применен к автогенераторам, моделируемым на любую другую частоту. Получившийся автогенератор имеет габаритные размеры, сопоставимые с габаритами импортных микросхем. Применение линий с распределенными параметрами позволило получить стабильные параметры автогенератора как в нормальных, так и в крайних климатических условиях. По результатам измерений уровень фазового шума составил минус 70 дБн/Гц на отстройке 10 кГц и минус 90 дБн/Гц на отстройке 100 кГц. Уровень выходной мощности минус 7 дБм. Уровень спектральных гармонических составляющих по отношению к основному сигналу составляет минус 30 дБ.

В. В. Терехин^{1,2}

¹ООО «ИПК «Электрон-Маш», Москва, Зеленоград, Российская Федерация

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Москва, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАТФОРМЫ СВЧ КИТ

Аннотация. Работа посвящена исследованию СВЧ-усилителей малой и средней мощности на платформе СВЧ КИТ. Приведены результаты измерений коэффициентов усиления и отражения, выходной мощности и коэффициента полезного действия трёх усилителей, а также результаты сравнения с традиционной методикой измерения усилителей со съёмными винтовыми разъёмами.

Ключевые слова: СВЧ-усилитель, СВЧ КИТ, широкополосный усилитель.

Для цитирования: Терехин В. В. Исследование СВЧ-усилителей малой и средней мощности с использованием платформы СВЧ КИТ // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 259–260.

V. V. Terekhin^{1,2}

¹LLC "IPK "Electron-Mash", Moscow, Zelenograd, Russian Federation

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation

INVESTIGATION OF LOW- AND MEDIUM-POWER MICROWAVE AMPLIFIERS USING THE MW KIT PLATFORM

Abstract. The work is devoted to the investigation of low- and medium-power microwave amplifiers using the MW KIT platform. The work presents the results of measurements of gain, return loss, output power, and power-added efficiency (PAE) for three amplifiers, and a comparison with the traditional measurement method using screw-type connectors.

Keywords: microwave amplifier, MW KIT, wideband amplifier.

For citation: Terekhin V. V. Investigation of low- and medium-power microwave amplifiers using the MW KIT platform // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 259–260.

В современной электронной промышленности успех разработки во многом определяется способностью быстро выводить на рынок новые продукты, особенно в условиях высокой конкуренции. В результате разработчикам предъявляются всё более жёсткие требования к срокам и эффективности, в том числе и в сегменте СВЧ-устройств. Одной из ключевых проблем в таких условиях остаются высокие операционные затраты, связанные с проектированием, изготовлением и отладкой индивидуальных печатных плат. На каждом этапе исследований требуются специализированные схемотехнические решения, пайка, контроль импедансов и повторная настройка, что удлиняет циклы НИОКР и формирует значительные расходы на одноразовую оснастку. Решением данной задачи становится переход к универсальным модульным платформам, допускающим многократное использование компонентов без пайки. Одной из таких платформ является СВЧ КИТ (svch-kit.ru).

СВЧ КИТ представляет собой сборочную систему, включающую механическую базу,

сменные модули (усилители, аттенюаторы, блоки питания) и универсальную коммутационную плату. Модули выполнены на стандартных печатных платах с унифицированными посадочными размерами, что обеспечивает повторное использование компонентов в различных конфигурациях. В рамках доклада рассматривается опыт исследования усилителей малой и средней мощности: iGB-700 (до 4 ГГц, 200 мВт), iGB-701 (до 10 ГГц, 100 мВт) и iFEM-771 (8–12 ГГц, до 4 Вт). Измерения коэффициентов передачи и отражения (S-параметров), выходной мощности на уровне 1 дБ сжатия, КПД и мощности, передаваемой в нагрузку, проводились с использованием векторного анализатора цепей и измерительного стенда, предназначенного для работы с сигналами повышенной мощности.

Сравнение с традиционной методикой (использование индивидуальных печатных плат с винтовыми разъемами Signal RF) показало сокращение времени подготовки измерений в 3–5 раз при сохранении точности. Модульная сборка обеспечивает высокую воспроизводимость результатов даже после многократной перекомпоновки тракта.

Полученные результаты демонстрируют эффективность применения СВЧ КИТ как инструмента для оперативного исследования СВЧ-усилителей в лабораторных, исследовательских и образовательных условиях. Платформа может быть рекомендована к использованию на этапе НИР, при подготовке прототипов и для задач, требующих гибкой конфигурации и ускоренной отладки.

А. И. Тюменцев, А. А. Тюменцева

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

УЗКОПОЛОСНЫЙ ФИЛЬТР С КОНВЕРТОРАМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Аннотация. Рассмотрена схема узкополосного LC фильтра. Рассмотрены вопросы замены реактивностей конверторами сопротивления. Проведены расчет и схемотехническое моделирование полученной схемы фильтра.

Ключевые слова: узкополосный фильтр, конвертор сопротивления, LC фильтр, полюса затухания.

Для цитирования: Тюменцев А. И., Тюменцева А. А. Узкополосный фильтр с конверторами сопротивления // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 261–263.

A. I. Tyumentsev, A. A. Tyumentseva

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

NARROW-BAND FILTER WITH RESISTANCE CONVERTERS

Abstract. The paper considers the circuit of a narrow-band LC filter, the issues of replacement of reactance by resistance converters, and shows the calculation and circuit simulation of the obtained filter circuit.

Keywords: narrow-band filter, resistance converter, LC filter, transmission zero.

For citation: Tyumentsev A. I., Tyumentseva A. A. Narrow-band filter with resistance converters // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 261–263.

Среди различных типов фильтров, применяемых в технике связи, LC-фильтры занимают достаточно большую нишу, выполняя много различных функций. Это входные устройства РПУ, различного вида преселекторы, многоканальные частотно-разделительные устройства, цепи согласования, подавление гармоник и т.д. При этом они используются в достаточно широком диапазоне частот от десятков герц до нескольких гигагерц.

Современная тенденция на миниатюризацию разрабатываемых РПУ и РПДУ требует и новых технических решений в области фильтрации, позволяющих получать высокие электрические характеристики фильтров при их миниатюрности.

Таким образом, целью данной работы является разработка миниатюрного узкополосного фильтра с малыми вносимыми потерями.

Для создания узкополосных миниатюрных фильтров от элементов, входящих в схему, требуется высокая добротность, для обеспечения малых вносимых потерь в полосе пропускания фильтра. Целесообразным будет использование схемы, в которой используется наименьшее число индуктивных элементов, так как потери в них в основном и определяют вносимые потери в фильтре. Наиболее целесообразно будет использовать схему, показанную на рис. 1.

Достоинством данной схемы является не только то, что она содержит минимальное значение индуктивностей, и возможность трансформации номиналов элементов

схемы, но также имеет возможность реализации полюса затухания на необходимой отстройке от полосы пропускания.

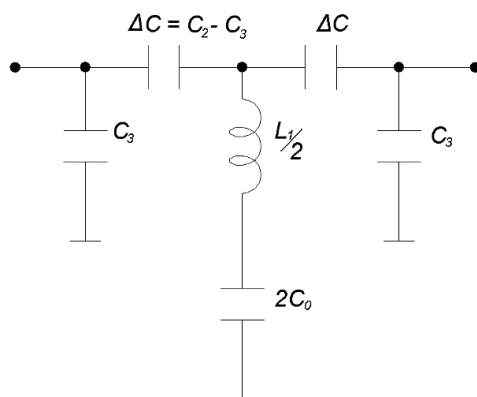


Рис. 1. Схема полосового фильтра с полюсом затухания

Реализация узкополосных фильтров (с относительной полосой пропускания менее 5%) требует высокой добротности элементов схемы. Если с добротностью конденсаторов проблем нет, то реализация высокой (более 300 ед.) добротности катушек индуктивности требует значительных габаритов.

С целью миниатюризации катушку индуктивности фильтра можно заменить обобщенным конвертором (ОК) сопротивления, который, имитируя заданную величину индуктивности, позволяет реализовать более высокие значения добротности. Рассмотрим схему ОК, приведенную на рис. 2.

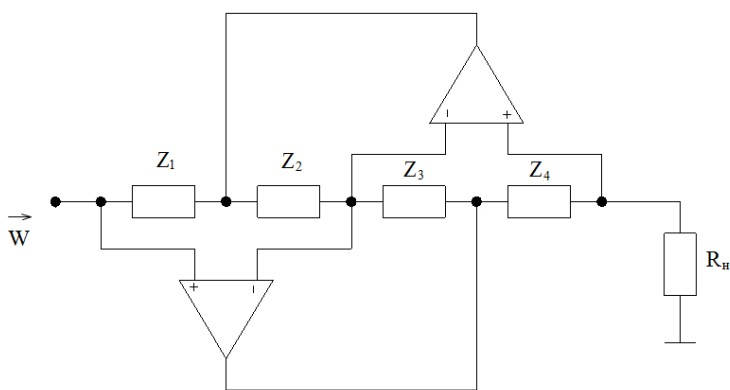


Рис. 2. Схема обобщенного конвертора сопротивления

Данный конвертор выполнен с применением двух операционных усилителей. Такой вариант включения ОУ наиболее часто используется на практике. Входное сопротивление ОК определяется входящими в него сопротивлениями $Z_1 - Z_4$ и нагрузочным сопротивлением R_n .

ОК может имитировать как индуктивность, так и емкость. Если сопротивления Z_1 , Z_2 , Z_3 и R_n являются активными, а сопротивление Z_4 будет емкостным, конвертер имитирует индуктивность.

Если сопротивление Z_1 будет емкостным, а остальные элементы – активными сопротивлениями, то входное сопротивление ОК будет иметь емкостной характер.

Заменяя индуктивность схемы рис. 1, на ОК имитирующий индуктивность получим возможно реализации узкополосного фильтра с малыми вносимыми потерями в полосе пропускания.

С целью проверки приведённых выше рассуждений был произведен расчет и схемотехническое моделирование фильтра на частоту 15 МГц с полосой пропускания 0,1%. Амплитудно-частотные характеристики фильтра, полученные путем схемотехнического моделирования, приведены на рис. 3.

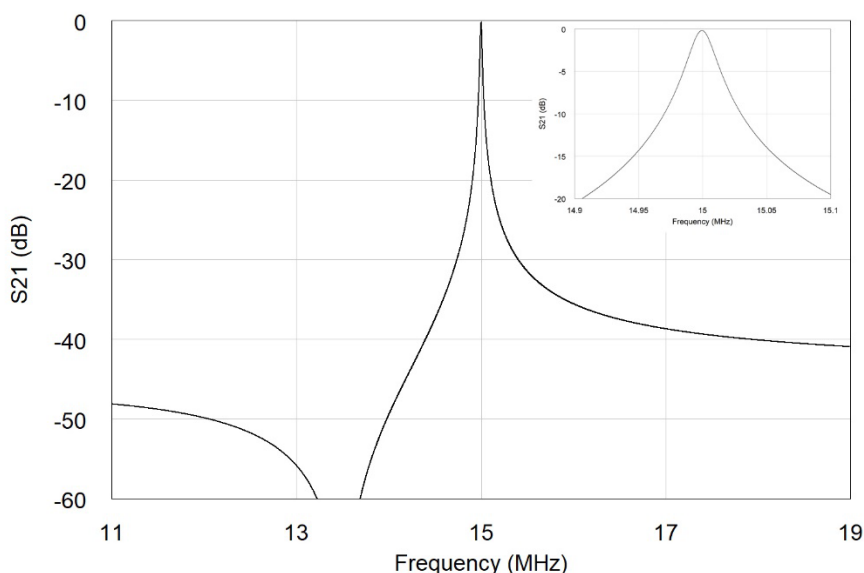


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика фильтра

Как видно из результатов моделирования, фильтр имеет центральную частоту полосы пропускания 15 МГц, полосу пропускания 20 кГц (0,13%) вносимые потери 0,2 дБ, а также полюс затухания отстроенный на 10% вниз от центральной частоты фильтра.

На основании вышеизложенного можно прийти к следующим выводам:

- рассмотренная схема полосового фильтра, содержащая минимальное количество индуктивных элементов, позволяющая реализовать узкополосные частотно-избирательные устройства с полюсом затухания на заданной частоте;
- проведенные расчет и схемотехническое моделирование показали правильность проведенных расчетов;
- показано, что рассмотренная схема при полосе пропускания 0,13% имеет вносимые потери не более 0,2 дБ.

А. А. Тюменцева

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ЕМКОСТНО-НАГРУЖЕННЫЙ ОБЪЕМНЫЙ РЕЗОНАТОР С НУЛЕМ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

Аннотация. Рассмотрена возможность использования в частотно-избирательных устройствах СВЧ-диапазона емкостно-нагруженных объемных резонаторов с нулем передаточной функции, выполненных по SIW-технологии с целью увеличения селективности.

Ключевые слова: объемный резонатор, СВЧ, интегральный резонатор, LTCC, SIW-технология.

Для цитирования: Тюменцева А. А. Емкостно-нагруженный объемный резонатор с нулем передаточной функции // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 264–265.

A. A. Tyumentseva

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

CAPACITIVE-LOADED CAVITY RESONATOR WITH ZERO TRANSMISSION FUNCTION

Abstract. The report shows the usability of capacitive-loaded cavity resonators with zero transmission function, manufactured using SIW-technology, in frequency-selective microwaves devices in order to increase selectivity.

Keywords: cavity resonator, microwaves frequency, integral resonator, LTCC, SIW technology.

For citation: Tyumentseva A. A. Capacitive-loaded cavity resonator with zero transmission function // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 264–265.

Все большее внимание в последние годы уделяется фильтрам на объемных резонаторах. Благодаря высокой добротности, малым вносимым потерям в полосе и возможности работать с сигналами большой мощности данный тип фильтров находит широкое применение. Как правило, такие фильтры реализуются в виде металлических структур. Емкостно-нагруженный объемный резонатор, выполненный на LTCC керамике по SIW-технологии, представляет собой керамическую подложку, на верхнем и нижнем слое которой имеется слой металлизации и соединяющиеся между собой отверстиями (рис. 1а). Внутри объемного резонатора имеются металлизированные штыри, один край которых соединен с нижней металлизированной обкладки, а верхние края свободны. Для увеличения емкости на свободный край внутренних штырей укладывается металлизированная пластина.

Применение таких резонаторов позволяет создавать малогабаритные фильтры СВЧ-диапазона с малыми потерями. Так как эквивалентная схема объемного резонатора с емкостной нагрузкой представляет собой колебательный контур, то характеристика затухания фильтра, выполненного на таких связанных резонаторах, будет иметь полиномиальный вид.

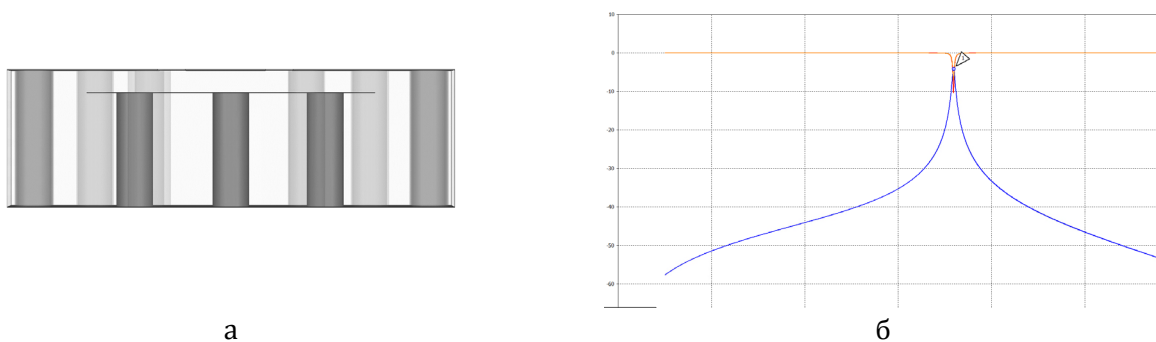


Рис. 1. Конструкция емкостно-нагруженного объемного резонатора, вид сбоку (а), АЧХ фильтра на объемных резонаторах с емкостной нагрузкой (б)

Для обеспечения высокой избирательности необходимо увеличение числа использованных резонаторов. Это ведет к росту потерь в полосе пропускания, габаритных размеров и ухудшению технологичности. От этого свободны емкостно-нагруженные объемные резонаторы с нулем передаточной функции (рис. 2а). Такие резонаторы представляют собой рассмотренный выше емкостно-нагруженный резонатор, расположенный в металлическом контуре, за счет которого и образуется ноль передаточной функции.

Местоположение нуля передаточной функции будет зависеть от расстояния между объемным резонатором и металлическим внешним контуром. Тогда, изменяя местоположение нуля передаточной функции можно реализовать фильтр, обладающий более высокой избирательностью по сравнению с фильтрами, реализованными на объемных резонаторах с емкостной нагрузкой

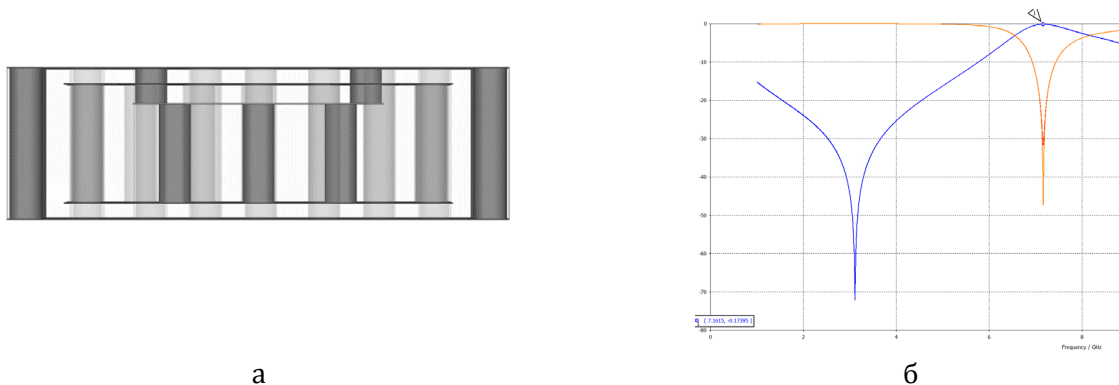


Рис. 2. Конструкция емкостно-нагруженного объемного резонатора с нулем передаточной функции, вид сбоку (а), АЧХ фильтра емкостно-нагруженного объемного резонаторах с нулем передаточной функции (б)

Заключение

Таким образом, использование объемных резонаторов с нулем передаточной функции позволяет создавать миниатюрные высокоизбирательные фильтры СВЧ диапазона с малыми вносимыми потерями. Но стоит учитывать, что, повышая частотную избирательность фильтра таким способом, будут увеличиваться габаритные размеры за счет дополнительного внешнего металлического контура.

О. В. Шакин^{1,4}, Г. В. Кулак², П. И. Ропот³, В. Н. Белый³, В. И. Казаков¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина
Мозырь, Беларусь

³Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси
Минск, Беларусь

⁴Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Санкт-Петербург, Российская Федерация

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

Аннотация. Теоретически и экспериментально исследована широкополосная акустооптическая дефлексия световых пучков в кристаллах ниобата лития с поверхностным возбуждением ультразвука системой встречно-штыревых электродов. Показано, что в тригональных кристаллах ниобата лития без учета электрооптического эффекта достижима ширина полосы акустооптического модулятора-дефлектора ~500–600 МГц, а при учете электрооптического эффекта ширина полосы пропускания составляет ~700 МГц. Амплитудно-частотная характеристика акустооптического модулятора-дефлектора со сканирующей диаграммой в условиях электроиндуцированной анизотропии существенно отличается от амплитудно-частотной характеристики устройства в ее отсутствие.

Ключевые слова: акустооптический дефлектор, ширина полосы дефлектора, кристалл ниобата лития, электроиндуцированная анизотропия, амплитудно-частотная характеристика.

Для цитирования: Шакин О. В., Кулак Г. В., Ропот П. И., Белый В. Н., Казаков В. И. Широкополосная дифракция света на объемных акустических волнах в кристаллах ниобата лития // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 266–268.

O. V. Shakin^{1,4}, G. V. Kulak², P. I. Ropot³, V. N. Bely³, V. I. Kazakov¹

¹Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Saint Petersburg, Russian Federation

²Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin, Mozyr, Belarus

³B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Belarus

⁴Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russian Federation

BROADBAND DIFFRACTION OF LIGHT BY VOLUME ACOUSTIC WAVES IN LITHIUM NIOBATE CRYSTALS

Abstract. Broadband acousto-optic deflection of light beams in lithium niobate crystals with surface excitation of ultrasound by a system of interdigitated electrodes is investigated theoretically and experimentally. It is shown that in trigonal lithium niobate crystals without taking into account electro-optical effect the achievable bandwidth of the acousto-optic modulator-deflector is ~500–600 MHz; and when the electro-optic effect is taken into account, the bandwidth is ~700 MHz. The amplitude-frequency characteristics of the acousto-optic modulator-deflector with a scanning diagram under conditions of electrically induced anisotropy differs significantly from the amplitude-frequency response of the device in its absence.

Keywords: acousto-optic deflector, deflector bandwidth, lithium niobate crystal, electrically induced anisotropy, amplitude-frequency characteristic.

For citation: Shakin O. V., Kulak G. V., Ropot P. I., Bely V. N., Kazakov V. I. Broadband diffraction of light by volume acoustic waves in lithium niobate crystals // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 266–268.

Дифракция света на ультразвуковых волнах с возможностью частотной перестройки в широком диапазоне находит многочисленные применения при создании различных акустооптических устройств обработки информации: широкополосных акустооптических дефлекторов и модуляторов, спектроанализаторов, корреляторов, демодуляторов частотно- и фазомодулированных сигналов. При этом важно знать форму амплитудно-частотной характеристики в широком частотном диапазоне.

Пусть в периоде d многоэлементной системы встречно-штыревых преобразователей сочетаются металлическая полоска шириной b и неметаллический участок шириной a (рис. 1а). Схема экспериментальной установки, предназначенной для наблюдения в кристалле ниобата лития ($LiNbO_3$) брэгговской акустооптической дифракции с поверхностным возбуждением ультразвуковых волн, представлена на рис. 1б.

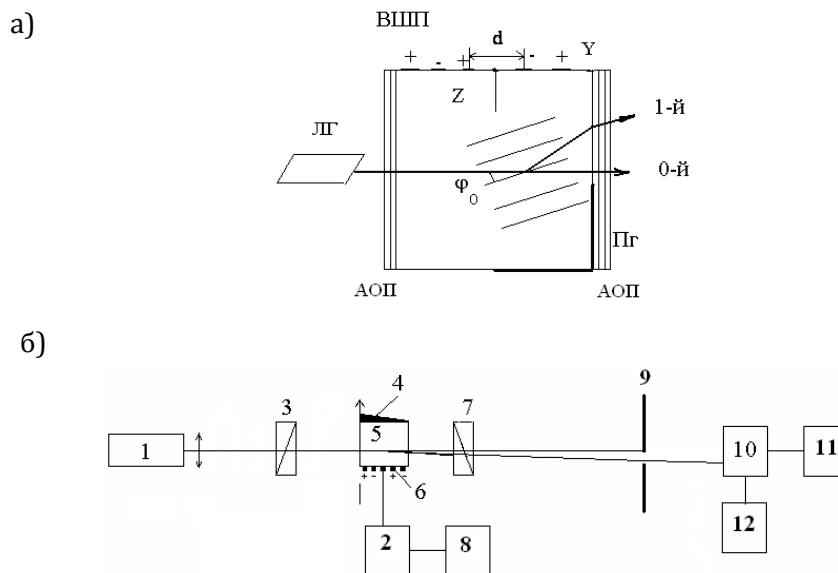


Рис. 1. Схемы: а) брэгговской АО дифракции (ВШП – встречно-штыревой преобразователь, Пг – поглотитель, ЛГ – лазерный генератор, АОП – антиотражающее покрытие); б) экспериментальной установки (1 – лазер; 2 – усилитель; 3, 7 – поляризаторы; 4 – поглотитель; 5 – кристалл; 6 – система встречно-штыревого преобразователя; 8 – усилитель; 9 – диафрагма; 10 – фотоприемник; 11 – осциллограф; 12 – измеритель мощности)

Подавая противофазное высокочастотное напряжение на электроды, можно возбудить объемные ультразвуковые волны высокой частоты, распространяющиеся под малыми углами к оси OZ .

Расчет нормированной эффективности дифракции $\eta_n = \eta_s / \eta_{max}$ производился для YZ -среза кристалла ниобата лития ($LiNbO_3$) в условиях изотропной дифракции обыкновенных световых волн, поляризованных перпендикулярно плоскости дифракции, на сдвиговых ультразвуковых волнах. Центральная частота ультразвуковой волны рассчитывалась по формуле $f_0 = v_s (n_o / \lambda_0 d)^{1/2}$ (v_s – скорость сдвиговой ультразвуковой

волны, λ_0 – длина световой волны в вакууме, n_o – обыкновенный показатель преломления кристалла, d – период встречно-штыревого преобразователя). Интенсивность ультразвуковой волны для YZ-среза кристалла LiNbO_3 определялась по формуле $I_a = (u_o^2 N f_0) / A d \nu_s 10^5$, где

$A = 8,6$, u_o – напряжение на электродах встречно-штыревого преобразователя, N – число пар электродов встречно-штыревого преобразователя).

Численные расчеты и эксперимент производились для одноосных кристаллов LiNbO_3 YZ-среза в условиях изотропной акустооптической дифракции обыкновенных световых волн на сдвиговых ультразвуковых волнах. Зависимость нормированной эффективности дифракции η_n от приведенной частоты $F = (f - f_0) / f_0$ ультразвуковой волны при разных значениях параметра возмущения показателя преломления (n) кристалла $\Delta n = (\lambda_0 L f_0^2 / n \tilde{\nu}_s^2) \delta n$ ($\delta n = n_o r_{22} |\vec{E}_e|$, где r_{22} – электрооптическая постоянная, $\vec{E}_e$ – напряженность внешнего электрического поля, $L = Nd$, $\tilde{\nu}_s = \nu_s (1 + \tilde{K}_s^2 / 2)$, причем $\tilde{K}_s$ – коэффициент электромеханической связи) изображена на рис. 2а. Анализируя представленную на нём зависимость, видим, что даже в условиях точного брэгговского синхронизма ($\varphi_0 = \varphi_B$ – угол Брэгга) амплитудно-частотной характеристики дефлектора может иметь широкий диапазон перестройки и приобретает форму двугорбой кривой с провалом в центре. При $\Delta n = 0,023$ ширина полосы частотной перестройки дефлектора составляет $\Delta f = 700$ МГц. На рис. 2б изображена амплитудно-частотная характеристика акустооптического модулятора-дефлектора на основе кристалла LiNbO_3 с характеристиками, соответствующими приведённым на рис. 1б.

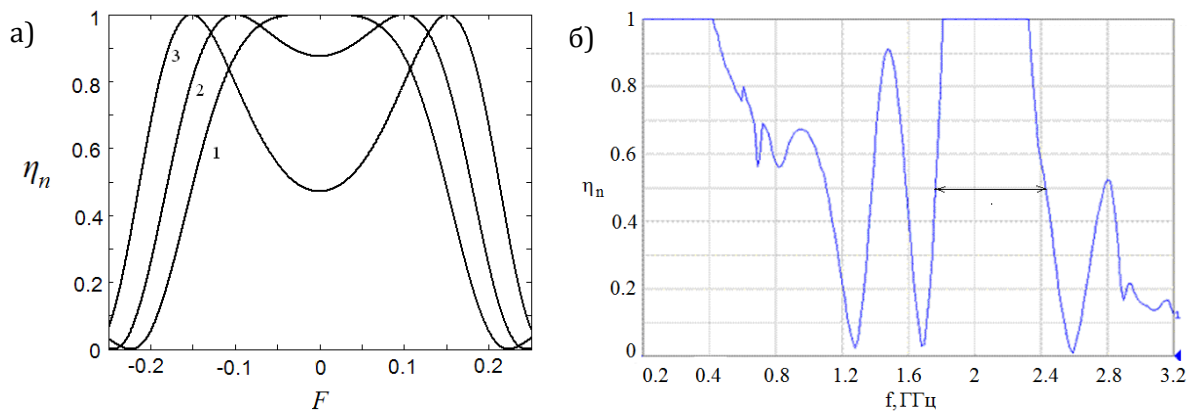


Рис. 2: а) зависимость нормированной эффективности дифракции η_n от приведенной частоты ультразвука F при $\varphi_0 = \varphi_B$ в условиях анизотропной дифракции при разной степени анизотропии ($d = 15,2$ мкм, $\lambda_0 = 0,63$ мкм, $N = 40$, $n_o = 2,3$; $p_{эф} = p_{14} = 0,07$; $I_a = 10$ Вт/см², $\varphi_0 = 0,076$ рад (4,35 град), $\eta_{max} = 0,02$, $f_0 = 1,75$ ГГц; 1 – $\Delta n = 0$; 2 – $\Delta n = 0,01$; 3 – $\Delta n = 0,023$); б) амплитудно-частотная характеристика АО модулятора-дефлектора (вдоль оси ординат отложены значения амплитуды, отсчитанные по шкале осциллографа; $f_0 = 1,75$ ГГц, $E_e = 0$, $\lambda_0 = 0,63$ мкм, LiNbO_3)

Зависимость нормированной эффективности дифракции η_n от приведенной частоты F ультразвуковой волны при разных значениях параметра Δn изображена на рис. 2а. При $\Delta n = 0,023$ ширина полосы частотной перестройки дефлектора составляет $\Delta f = 700$ МГц. Из рис. 2 следует удовлетворительное соответствие результатов теоретических расчётов с экспериментальными результатами (рис. 2б). При этом ширина полосы пропускания акустооптического дефлектора составляет ~ 500 - 600 МГц.

А. М. Бадамшин¹, В. С. Ковивчак²

¹Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

²Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

**ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА
НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА
БЕЗВОЛЬФРАМОВОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА**

Аннотация. Исследовано изменение структурно-фазового состава и свойств безвольфрамового твердого сплава состава (50 TiC – 50 NiTi) об. % в результате воздействия мощного ионного пучка состава 30% H⁺ и 70% C⁺ с энергией частиц $E \approx 250$ кэВ и плотностью ионного тока 150 А/см². С использованием метода растровой электронной микроскопии установлено, что облучение приводит к плавлению поверхности твердого сплава и образованию микротрещин. Рентгенофотоэлектронные исследования показали, что данный вид обработки приводит к восстановлению оксидов титана и формированию дополнительных карбидных соединений титана на поверхности твердого сплава. Установлено, что данный вид обработки увеличивает микротвердость и износостойкость облученных поверхностных слоёв.

Ключевые слова: безвольфрамовые твердые сплавы, карбид титана, никелид титана, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

Для цитирования: Бадамшин А. М., Ковивчак В. С. Влияние воздействия мощного ионного пучка на структурно-фазовый состав и свойства безвольфрамового твердого сплава // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 269–272.

A. M. Badamshin¹, V. S. Kovivchak²

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

²Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

**INFLUENCE OF POWERFUL ION BEAM
ON THE STRUCTURAL PHASE COMPOSITION AND PROPERTIES
OF TUNGSTEN-FREE HARD ALLOY**

Abstract. The paper studies the change in the structural-phase composition and properties of tungsten-free hard alloy with the composition (50 TiC – 50 NiTi) vol. % as a result of exposure to a powerful ion beam of 30% H⁺ + 70% C⁺ with particle energy $E \approx 250$ keV and ion current density of 150 A/cm². Using the scanning electron microscopy method, it was found that irradiation leads to melting of the hard alloy surface and formation of microcracks. X-ray photoelectron studies show that this type of treatment leads to the reduction of titanium oxides and formation of additional titanium carbide compounds on the surface of the hard alloy. It was found that this type of treatment increases the microhardness and wear resistance of the irradiated surface layers.

Keywords: tungsten-free hard alloys, titanium carbide, titanium nickelide, X-ray photoelectron spectroscopy.

For citation: Badamshin A. M., Kovivchak V. S. Influence of powerful ion beam on the structural phase composition and properties of tungsten-free hard alloy // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025 P. 269–272.

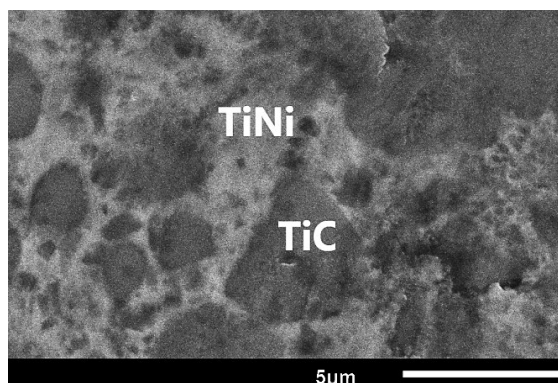
Обработка металлов резанием занимает важную роль при производстве корпусных элементов изделий радиоэлектронной аппаратуры. Качество проведения операций механической обработки зависит от прочностных характеристик и физических свойств используемых металлорежущих пластин. К наиболее распространенной группе материалов для изготовления металлорежущих пластин относятся порошковые твердые сплавы на основе карбида вольфрама и кобальта. Они обладают хорошими механическими свойствами (предел прочности, твердость, ударная вязкость), но их недостатком является дефицит и высокая стоимость WC и Co.

Перспективным и доступным аналогом данных сплавов являются безвольфрамовые твердые сплавы на основе карбида титана. Их свойства максимально приближены к твердым сплавам системы «WC-Co», однако они уступают последним по значению твердости и прочности.

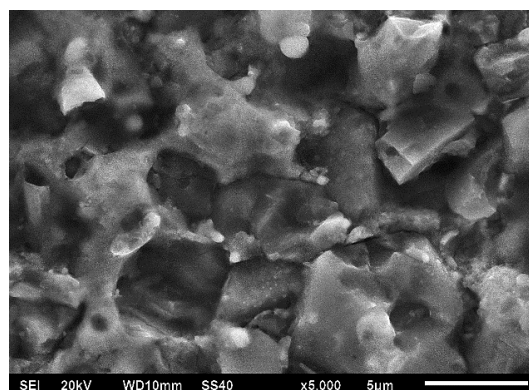
Одним из способов повышения свойств твердых сплавов является обработка их поверхности мощными ионными пучками наносекундной длительности. Воздействие пучков может приводить к сверхбыстрому разогреву, плавлению и последующей кристаллизации облучаемых материалов, что сопровождается образованием новых химических соединений и фаз и приводит существенному изменению свойств их поверхности. Важно отметить, что глубина эффективного модифицированного слоя в результате облучения, как правило, не превышает 1 мкм, что накладывает дополнительные требования к выбору аналитического оборудования для исследования изменений, произошедших в результате воздействия пучка. Реализация таких исследований возможна, например, с использованием комбинации поверхностно-чувствительных методов анализа (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, энергодисперсионный анализ) для проведения оценки изменения химического состава и растровой электронной микроскопии для исследования морфологии облученной поверхности.

Целью данной работы является исследование влияния воздействия мощного ионного пучка состава (30% H⁺ и 70% C⁺) с энергией частиц $E \approx 250$ кэВ, длительностью импульса ~ 60 нс при плотности ионного тока 150 А/см² на изменение и фазового состава, а также морфологии поверхностных слоёв твердого сплава состава (50 TiC – 50% TiNi) об. %.

На рис. 1 приведены микроизображения поверхности твердого сплава в исходном состоянии (а) и после облучения мощным ионным пучком (б) с числом импульсов $n=1$. В исходном состоянии на поверхности наблюдаются зёрна округлой формы (карбид титана), вокруг которых распределена связка TiNi. Средний размер зёрен TiC составляет ~ 3 -5 мкм. После облучения происходит оплавление поверхности твердого сплава, что свидетельствует о достижении температур, превышающих $T_{пл}$ связки TiNi ($\sim 1300^\circ\text{C}$).



а



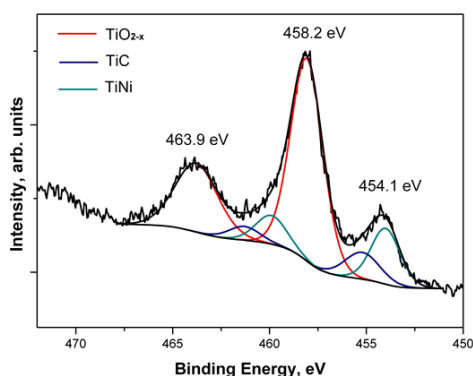
б

Рис. 1. Микроизображения поверхности твердого сплава 50% TiC – 50% NiTi:
а) в исходном состоянии, б) после облучения с числом импульсов $n = 1$

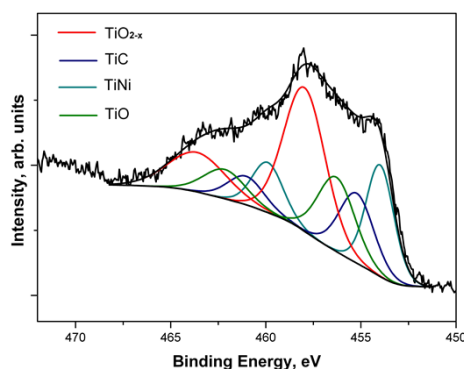
Исследование изменений химического состояния поверхности проводилось с использованием метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

На рис. 2 представлены Ti_{2p} спектры для твердого сплава в исходном состоянии (а) и после воздействия мощного ионного пучка (б). Спектр исходного образца аппроксимируется тремя дублетными компонентами с максимумами на энергиях связи: 458,2, 455,1 и 454,1 эВ, что соответствует нестехиометрическому оксиду TiO_{2-x}, карбиду TiC и металлическому титану Ti⁰, входящему в состав NiTi.

Спектр Ti_{2p} образца, облученного ионным пучком, имеет существенные отличия от исходного. Наиболее интенсивный максимум (458,1 эВ) отвечает оксиду TiO_{2-x}. Максимум на энергии связи 456,4 эВ отвечает оксиду TiO. Интенсивность компонентов, отвечающих NiTi и TiC существенно увеличивается в сравнении с исходным образцом. Данные изменения указывают на протекание процессов восстановления оксида титана и формирования дополнительных карбидных соединений TiC на поверхности сплава в результате облучения. Протекание данных процессов в совокупности позволяет сделать предположение о том, что при воздействии мощного ионного пучка происходит карбо-термического восстановления оксида титана, а конечным продуктом реакции являются карбиды титана. Источником углерода в данном случае может являться поверхностно-адсорбированный углерод, а также углерод, непосредственно из ионного пучка. Необходимая для протекания данной реакции температура (>1200 °C) подтверждается плавлением поверхности твердого сплава при облучении.



а



б

Рис. 2. Ti_{2p} спектры поверхности твердого сплава 50% TiC – 50% NiTi:
а) в исходном состоянии, б) после облучения с числом импульсов $n = 1$

При проведении исследования было установлено, что данный вид воздействия приводит к повышению среднего значения микротвердости образцов на ~ 27% (с 1165 до 1596 ед. HV) и снижению скорости массового изнашивания при трении об абразив до 3,3 раз.

При проведении исследования было установлено:

1. Воздействие мощного ионного пучка состава 30% H^+ + 70% C^+ с энергией частиц $E \approx 250$ кэВ, длительностью импульса ~ 60 нс при плотности ионного тока 150 А/см² приводит к плавлению поверхности безвольфрамового твердого сплава (50 TiC – 50 NiTi) об. %.

2. При облучении на поверхности твердого сплава происходит процесс восстановления оксидов титана, а также формирование дополнительных Ti-C соединений в оплавленном в результате воздействия пучка слое. Предположено, что формирование дополнительных карбидных соединений происходит по реакции карботермического восстановления оксида титана.

3. Воздействие ионных пучков приводит к существенному увеличению (~ на 27%) микротвердости образцов и их износостойкости при абразивном трении.

Дальнейшие исследования будут посвящены изучению влияния мощных ионных пучков на изменение морфологии, структуры и состава безвольфрамовых твердых сплавов других составов, в частности сплавов на основе карбонитрида титана TiCN.

Баландин Д.А.

ООО «ИПК «Электрон-Маш», Москва, Зеленоград, Российская Федерация

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА ДЛЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ ПРОИЗВОДСТВА КОМПАНИИ ООО «ИПК «ЭЛЕКТРОН-МАШ»

Аннотация. Представлен обзор продуктовой линейки СВЧ-компонентов, включающей усилители различной мощности, преобразователи сигналов, генераторы и синтезаторы частоты, программно-конфигурируемые радиосистемы, измерительную аппаратуру, специализированные корпуса для СВЧ электронной компонентной базы, а также приведено описание системы быстрого прототипирования СВЧ-трактов «СВЧ КИТ».

Ключевые слова: СВЧ-компоненты, система быстрого прототипирования.

Для цитирования: Баландин Д. А. Современная электронная компонентная база для СВЧ-электроники производства компании ООО «ИПК «Электрон-Маш» // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 273–274.

D. A. Balandin

LLC “IPK “Electron-Mash”, Moscow, Zelenograd, Russian Federation

MODERN ELECTRONIC COMPONENT BASE FOR MICROWAVE ELECTRONICS PRODUCED BY LLC “IPK “ELEKTRON-MASH”

Abstract. The paper presents an overview of the product line of microwave components, including amplifiers of various power levels, signal converters, frequency generators and synthesizers, software-configurable radio systems, measuring equipment, specialized housings for microwave electronic components, as well as a description of the “SVCH KIT” rapid prototyping system for microwave signal chains.

Keywords: microwave components, rapid prototyping system.

For citation: Balandin D. A. Modern electronic component base for microwave electronics produced by LLC “IPK Elektron-Mash” // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025 P. 273–274.

Современный рынок радиоэлектронных систем требует комплексного подхода к разработке СВЧ-компонентов различного функционального назначения. Актуальность создания отечественной элементной базы обусловлена необходимостью обеспечения технологического суверенитета в области радиоэлектроники. Цель доклада – представить широкую номенклатуру СВЧ-компонентов компании и продемонстрировать возможности комплексного подхода к созданию радиоэлектронных систем.

Продуктовая линейка охватывает семь основных направлений. СВЧ-усилители включают компоненты малой, средней и большой мощности на основе GaN и GaAs технологий с выходной мощностью от единиц милливатт до сотни ватт в диапазоне частот до 40 ГГц. Преобразователи сигналов представлены делителями, умножителями и смесителями частот, квадратурными модуляторами и демодуляторами, аттенюаторами и фазовращателями, регулируемые усилителями, монолитными безотражательными фильтрами и СВЧ-ключами. Схемы управления питанием включают контроллеры и модуляторы питания специально для GaN и GaAs СВЧ-усилителей мощности. Генераторы

и синтезаторы частоты содержат генераторы, управляемые напряжением, синтезаторы частоты с ГУН и схемы ФАПЧ. Программно-конфигурируемые радиосистемы обеспечивают гибкость построения современных радиосистем. Измерительная аппаратура включает измерительные СВЧ-усилители мощности, оснастку и тару для тестирования. Корпуса для СВЧ ЭКБ представлены керамическими и металлоорганическими решениями для изделий СВЧ и силовой электроники.

Компоненты изготавливаются с использованием современных GaN и GaAs технологий, обеспечивающих высокую надежность и производительность. Корпусирование выполняется в керамических и металлоорганических корпусах с учетом специфики СВЧ-применений. Комплексный подход позволяет создавать законченные решения для базовых станций сотовой связи, радиолокационных комплексов, спутниковых терминалов и систем радиоэлектронной борьбы.

Представленная продуктовая линейка обеспечивает комплексное решение задач построения современных СВЧ-систем от отдельных компонентов до программируемых радиосистем. Широкая номенклатура изделий и возможность их интеграции позволяют создавать конкурентоспособные радиоэлектронные системы различного назначения с минимальными затратами на разработку.

Система быстрого прототипирования для построения СВЧ-трактов «СВЧ КИТ» выполнена в формате конструктора, состоящего из взаимозаменяемых унифицированных блоков, основанных на микросхемах отечественного производства. Использование инновационных СВЧ-переходов между блоками позволяет работать с частотами до 40 ГГц без пайки. Таким образом, основные задачи, которые решает СВЧ КИТ – это быстрое прототипирование радиоэлектронных трактов, внедрение ЭКБ отечественного производства, обучение студентов ВУЗов, снижение временных и денежных затрат.

Д. А. Баландин¹, И. В. Брынцев^{1,2}, А. Ю. Евлампьев^{1,2}

¹ООО «ИПК «Электрон-Маш», Москва, Зеленоград, Российская Федерация

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Москва, Российская Федерация

СТАТИЧЕСКИЙ СВЧ-ДЕЛИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Аннотация. Работа посвящена разработке статического СВЧ-делителя частоты миллиметрового диапазона длин волн. Приведены результаты исследования делителя частоты, включая оценку потерь на измерительной оснастке и сравнение с импортными аналогами.

Ключевые слова: делитель частоты, миллиметровые волны, синтезатор частот, фазовый шум.

Для цитирования: Баландин Д. А., Брынцев И. В., Евлампьев А. Ю. Статический СВЧ-делитель частоты миллиметрового диапазона длин волн // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 275–276.

D. A. Balandin¹, I. V. Bryntsev^{1,2}, A. Y. Evlampev^{1,2}

¹LLC "IPK "Electron-Mash", Moscow, Zelenograd, Russian Federation

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation

STATIC MICROWAVE FREQUENCY DIVIDER FOR THE MILLIMETER-WAVE RANGE

Abstract. This work is devoted to the development of a static microwave frequency divider for the millimeter-wave range. The results of the investigation of the frequency divider are presented, including the assessment of losses on the evaluation board and a comparison with imported counterparts.

Keywords: frequency divider, millimeter-wave, frequency synthesizer, phase noise.

For citation: Balandin D. A., Bryntsev I. V., Evlampev A. Y. Static microwave frequency divider for the millimeter-wave range // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 275–276.

Изделия миллиметрового диапазона широко используются в беспроводных сетях ближнего действия, автомобильных радарх и перспективных стандартах мобильной связи для новых приложений, охватывающих частоты 28, 36, 45, 73 и 79 ГГц. Для таких приложений требуются синтезаторы частоты с широким диапазоном настройки, высокой точностью и минимальным энергопотреблением.

Одним из ключевых компонентов синтезаторов частоты, а также приемо-передающих трактов радиолокационных и телекоммуникационных систем, являются делители частоты. Характеристики делителя частоты напрямую влияют на параметры всей системы, что подчеркивает актуальность их дальнейшего развития.

Высокоскоростные цифровые интегральные микросхемы, включая делители частоты, преимущественно разрабатываются на основе гетеробиполярных технологий. Это обусловлено высокой граничной частотой транзисторов и стабильностью их характеристик в миллиметровом диапазоне. Наибольшее распространение получили техно-

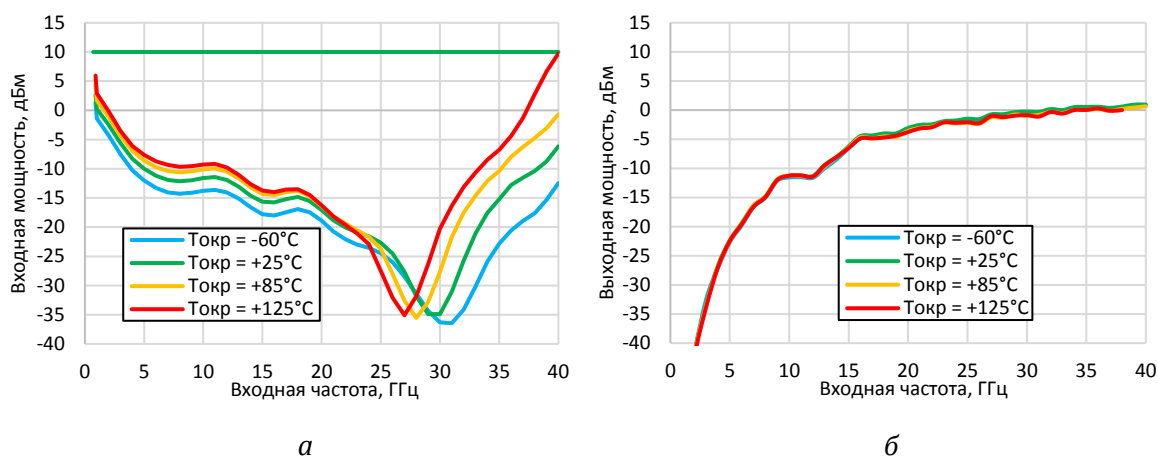
логические процессы на основе InP, GaAs и SiGe. Делители частоты на InP ГБТ демонстрируют максимальное быстродействие, GaAs ГБТ характеризуются сравнительно низкой стоимостью производства, а SiGe ГБТ обеспечивают высокие частотные характеристики при пониженном энергопотреблении.

В рамках данной работы была разработана СВЧ МИС статического делителя частоты с программируемым коэффициентом деления на 2, 4, 8 и диапазоном входных частот свыше 40 ГГц (рис. а), реализованная на кремний-германиевом гетеробиполярном технологическом процессе. Диапазон чувствительности лежит в интервале от -10 до 10 дБм. Микросхема делителя частоты работает в диапазоне температур от -60 до 125 °С. Типовое значение выходной мощности составляет -3 дБм при входной частоте свыше 16 ГГц (рис. б). Снижение выходной мощности на входных частотах ниже 16 ГГц обусловлено использованием разделительных конденсаторов на выходе кристалла делителя частоты. Относительный уровень фазового шума делителя частоты составляет -150 дБ/Гц при коэффициенте деления 2. Делитель частоты работает при напряжении питания 3,3 В с током потребления 124 мА. СВЧ МИС согласована по входу и выходу с линией с волновым сопротивлением 50 Ом. Выбор коэффициента деления выполняется при подаче логических уровней на управляющие выводы микросхемы в соответствии с таблицей истинности.

В миллиметровом диапазоне длин волн измерительная оснастка вносит существенные потери, что приводит к снижению чувствительности исследуемой микросхемы. Представленные результаты измерения чувствительности приведены с учетом компенсации потерь оснастки.

Параметры разработанной микросхемы делителя частоты соответствуют импортным аналогам: UXN40M7K, ASNT8133-KMC, HMC862A, HMC447LC3.

Разработанный делитель частоты доступен в металлоорганическом корпусе M016-3030-01 и соответствует по габаритам и цоколевке микросхеме делителя частоты HMC862A.



Результаты измерений диапазона чувствительности (а) и выходной мощности от входной частоты (б) при $U_{пит} = 3,3$ В, $P_{вх} = 0$ дБм и коэффициенте деления 8

А. Л. Богословцева, О. Н. Шевченко, П. В. Гейдт

Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

ИЗУЧЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

Аннотация. Нитрид алюминия является перспективным материалом для создания резонаторов на объёмных акустических волнах. Одним из неразрушающих подходов к контролю качества пленок является определение их оптических свойств. В данной работе пленки AlN были получены с использованием магнетронного распыления. Были определены значения толщины, показателя преломления и положения фононных мод для пленок нитрида алюминия толщиной от 2,2 до 9,4 мкм, а также значения продольной скорости звука.

Ключевые слова: нитрид алюминия, магнетронное распыление, оптические свойства, скорость звука.

Для цитирования: Богословцева А. Л., Шевченко О. Н., Гейдт П. В. Изучение акустических и оптических свойств пленок нитрида алюминия // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 277–278.

A. L. Bogoslovstseva, O. N. Shevchenko, P. V. Geydt

Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF ACOUSTIC AND OPTICAL PROPERTIES OF ALUMINUM NITRIDE FILMS

Abstract. Aluminum nitride is a promising material for developing resonators based on bulk acoustic waves. A non-destructive method for quality control of films involves determining their optical properties. In this study, AlN films were produced using magnetron sputtering. The values of thickness, refractive index, and phonon mode positions for aluminum nitride films with a thickness from 2,2 to 9,4 μm , as well as the longitudinal sound speed were obtained.

Keywords: aluminum nitride, magnetron sputtering, optical properties, speed of sound.

For citation: Bogoslovstseva A. L., Shevchenko O. N., Geydt P. V. Investigation of acoustic and optical properties of aluminum nitride films // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025 P. 277–278.

Нитрид алюминия (AlN) активно применяется в микроэлектронике и фотонике, поскольку обладает большой шириной запрещенной зоны, пьезоэлектрическим коэффициентом, достигающим значения 5,5 пм/В, и высокой скоростью распространения звука в материале (11 км/с). Благодаря последнему свойству, AlN является перспективным материалом для создания резонаторов на объёмных акустических волнах (ОАВ). При этом свойства материала будут зависеть от его внутреннего строения и структуры. Определение оптических свойств AlN методами рассеяния Мандельштама-Брюллиэна (РМБ), инфракрасной Фурье-спектроскопии и комбинационного рассеяния света (КРС) являются неразрушающими методами контроля качества получаемых пленок. Помимо этого, анализ спектров может предоставить информацию об акустических свойствах ма-

териала. В большинстве случаев для расчета толщины пленки AlN для подбора конкретных значений частоты резонаторов на ОАВ используется табличное значение продольной скорости звука в монокристалле, что может привести к смещению частоты резонатора. В нашей работе производится оценка влияния качества пленок AlN на значения скорости звука в них.

В данной работе пленки AlN были получены с использованием магнетронной распылительной системы с биполярным источником питания APEL-M-1.5BP-800-2, работающим в асимметричном биполярном импульсном режиме постоянного тока на частоте 100 кГц с коэффициентом заполнения 70%. Напыление пленок AlN с толщинами в диапазоне 2,2 до 9,4 мкм проводилось с изменением продолжительности напыления при рабочем давлении 0,2 Па, температуре подложки 200 °С, мощности магнетрона 300 Вт, суммарном потоке аргона и азота в 100 мл/мин и доле азота 20%. Изготовление пленок с толщинами в несколько микрон было необходимо для получения данных с применением метода рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. РМБ аналогичен низкочастотному комбинационному рассеянию света, в котором рассеяние световой волны происходит на флуктуациях плотности конденсированной среды, связанных с собственными акустическими модами. Рассеяние на таких модах приводит к появлению пиков в спектрах РМБ, которые связаны с модулем упругости среды и скоростью звука в ней. С помощью этой методики были оценены значения скорости звука в пленках AlN и оказалось, что для большей части образцов они сопоставимы со значением скорости звука в монокристалле. Для определения толщины пленок применялся высокочувствительный оптический метод – эллипсометрия. Неопределенность параметров модели, т.е. погрешность метода, для этой серии образцов составила: $\delta D(\text{AlN}) = 10$ нм, $\delta n = 0,05$. С учетом этой погрешности значения толщин варьируются от 2227 нм до 9350 нм, а показатель преломления от 1,95 до 2,14, что характерно для гексагональных пленок нитрида алюминия. С помощью ИК-Фурье и КРС спектроскопии определены положения пиков фононных мод $E_1(\text{TO})$ и E_2^2 соответственно.

Таким образом, в ходе работы были получены данные о показателе преломления и положении пиков фононных мод пленок нитрида алюминия толщиной от 2,2 до 9,4 мкм, а также определены значения скорости звука, лежащие от 10,4 до 11,4 км/с.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FSUS-2024-0020 на базе приборного парка ЦКП «ВТАН» НГУ.

Л. А. Васильева, В. А. Труньков

АО «ЛИТ-ФОНОН», Москва, Российская Федерация

УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Аннотация. Приведен обзор приборов для измерения электрических параметров кварцевых резонаторов советского, иностранного и российского производства. На замену устаревших измерительных приборов предложены к использованию программно-аппаратные комплексы LF400 и LF1, разработанные АО «ЛИТ-ФОНОН». В процессе работы проведены эксперименты для сравнения программно-аппаратных комплексов с аналогами. Отобраны несколько партий резонаторов, электрические параметры которых замерены как на программно-аппаратных комплексах, так и на аналогичном оборудовании. Приведена сравнительная характеристика погрешностей измерений программно-аппаратных комплексов и приборов-аналогов. Установлены границы применимости приборов иностранного производства, производства СССР и разработанных программно-аппаратных комплексов. Приведены технические характеристики и принципы функционирования разработанных комплексов.

Ключевые слова: кварцевые резонаторы, программно-аппаратные комплексы, частота, электрические параметры, рефлектометр.

Для цитирования: Васильева Л. А., Труньков В. А. Установки для контроля электрических параметров кварцевых резонаторов // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 279–281.

L. A. Vasilyeva, V. A. Trunkov

JSC "LIT-PHONON", Moscow, Russian Federation

INSTALLATIONS FOR MONITORING ELECTRICAL PARAMETERS OF QUARTZ RESONATORS

Abstract. The article provides an overview of devices for measuring the electrical parameters of quartz resonators of Soviet, foreign and Russian manufacture. To replace obsolete measuring devices, JSC "LIT-PHONON" has developed LF400 and LF1 software and hardware systems. In the course of the work, experiments were conducted to compare the hardware and software systems with their analogues. Several lots of resonators were selected, the electrical parameters of which were measured both on the hardware and software systems and on similar equipment. The measurement errors of the hardware and software systems were compared with those of similar devices. The report defines the applicability limits of foreign-made devices, those manufactured in the USSR, and developed hardware and software systems, and provides technical characteristics and operating principles of the developed systems.

Keywords: quartz resonators, hardware and software systems, frequency, electrical parameters, reflectometer.

For citation: Vasilyeva L. A., Trunkov V. A. Installations for monitoring electrical parameters of quartz resonators // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025 P. 279–281.

Производство изделий пьезотехники, таких как кварцевые резонаторы, имеет важное значение для электронной промышленности. Резонаторы применяются в радиоэлектронной аппаратуре в качестве элементов стабилизации и селекции частоты. Следовательно, существует необходимость разработки программно-аппаратных комплексов отечественного производства для замеров электрических параметров кварцевых резонаторов. Наличие такого оборудования дает возможность обеспечения производств пьезотехники и испытательных лабораторий современным высокотехнологичным оборудованием, в независимости от санкционной политики, и соответственно развития электронной промышленности России в целом. Для измерения параметров резонаторов на российских предприятиях используется большое количество различных аналоговых приборов, разработанных еще в СССР, таких как серия измерителей добротности и эквивалентных динамических параметров кварцевых резонаторов ИПРД, серия технологических кварцевых генераторов ТГК и другие. Однако в настоящее время, при эксплуатации данных приборов возникает ряд проблем, связанных с их моральным и техническим устареванием. Несовместимость аналоговых приборов с компьютерной техникой приводит к сложностям с автоматизацией процессов измерения характеристик резонаторов, а также с цифровой обработкой и анализом результатов измерений, на основании которых осуществляется принятие решений об автоматической отбраковке резонаторов при несоответствии электрических параметров требованиям нормативной документации. Такие приборы требуется вручную калибровать перед измерениями, что занимает значительную часть рабочего времени и приводит к низкой повторяемости результатов измерений. Также, измерения на таких приборах подвержены влиянию внешних факторов окружающей среды - температуры и влажности, что увеличивает погрешности измерений. Большинство аналоговых приборов обладают пониженной точностью измерения в пределах 1-5 %. У аналогичных цифровых приборов точность измерения составляет от 0,01 до 1,5 %. Эксплуатационный ресурс аналоговых приборов выработан, в их составе много электромеханических компонентов, которые изнашиваются с течением времени и требуют замены. В связи с низкой доступностью требуемых компонентов, ремонт и обслуживание практически невозможны. Современные импортные устройства, например фирм Kolinker, Saunders & Associates или *Sansei Showa Co. Ltd.*, также позволяют измерять параметры кварцевых резонаторов. Однако использование импортного оборудования сопряжено с рядом проблем. В настоящее время в связи с санкционной политикой, приобретение такого оборудования и компонентов для его ремонта и обслуживания затруднено. Кроме того, потребителю самому необходимо адаптировать программное обеспечение под свои нужды, что не всегда возможно, так как разработчики могут не предоставлять библиотеки. Также импортное оборудование требует сертификации, а его стоимость существенно возросла. Поставленная задача – разработка конкурентоспособного высокотехнологичного цифрового программно-аппаратного комплекса для пьезотехнических производств и лабораторий, обеспечивающего контроль электрических параметров кварцевых резонаторов и частото задающих комплектующих – пьезоэлементов, входящих в их состав. Для решения данной задачи были использованы методы математического и физического моделирования, методы схемотехники и теоретической механики. Для решения поставленной задачи и обеспечения пьезотехнических производств и лабораторий высокотехнологичным современным программно-аппаратным комплексом, предприятием АО «ЛИТ-ФОНОН» были разработаны оригинальные измерительные установки, представляющие из себя программно-аппаратные комплексы для контроля электрических параметров кварцевых резонаторов LF400 и LF1.

Установка LF400 разработана на базе векторного анализатора цепей, управляемого компьютером, выполненного в виде настольного прибора и рефлектометра (направленного ответвителя). Она представляет собой программно-аппаратный комплекс, предназначенный для измерения параметров кварцевых резонаторов и пьезоэлементов в процессе их производства, контроля и испытаний.

Установка позволяет выполнять расчет добротности, непрерывное измерение и визуальный контроль параметров пьезоэлектрических резонаторов в процессе их настройки, а также измерение и построение графика зависимости изменения параметров резонаторов от времени, таких как частота, динамическое сопротивление и добротность. Установка LF1 разработана на базе перестраиваемого по частоте низкочастотного генератора ГНЧ1, управляемого компьютером. Она представляет собой программно-аппаратный комплекс, предназначенный для измерения параметров низкочастотных кварцевых резонаторов в процессе их производства, контроля и испытаний. Установка позволяет выполнять расчет добротности Q .

Для сравнения разработанных программно-аппаратных комплексов LF400 и LF1 с производственным оборудованием советского и иностранного производства были проведены измерения электрических параметров кварцевых резонаторов на разработанных установках и аналогичном оборудовании советского и иностранного производства. Установка LF400 не уступает импортным аналогам (Transat, Kolinker) по эксплуатационным и техническим характеристикам и способна их полностью заменить. Погрешности измерений LF400 и Transat SCN-6000 сопоставимы. Установка LF1 превосходит отечественные аналоги по эксплуатационным и техническим характеристикам, способна заменить ряд приборов:

- серию технологических кварцевых генераторов ТГК;
- серию измерителей добротности и эквивалентных динамических параметров кварцевых резонаторов ИПРД;
- измеритель LCR-76002.

Погрешности измерений установки LF1, генератора ТГК2, измерителей ИПРД и LCR-76002 сопоставимы. Разработанные установки позволяют решить задачи по определению параметров кварцевых резонаторов и обеспечить высокое качество производимой продукции пьезотехники. Они дают возможность существенно упростить, ускорить и автоматизировать процесс измерения параметров изделий в сравнении с устаревшими советскими приборами и сделать процесс измерения более удобным в сравнении с зарубежными установками, при этом не уступают им по техническим характеристикам. Так как эти установки разработаны отечественным предприятием АО «ЛИТ-ФОНОН», возможно проведение небольшой адаптации программного обеспечения под индивидуальные требования потребителя. Метрологическая служба АО «ЛИТ-ФОНОН» аккредитована на проведение поверки LF400. На базе предприятия-изготовителя возможно проведение первичной и периодической поверки данного программно-аппаратного комплекса.

П. В. Гейдт, А. Л. Богословцева

Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФЕКТОВ В ПЛЁНКАХ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕНТГЕНОВСКИХ МЕТОДОВ И ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Аннотация. Определение зависимости между механическими напряжениями и условиями роста позволит установить основные причины возникновения дефектов в пьезоактивных плёнках AlN. Знание механизма может быть использовано для оптимизации технологий производства плёнок AlN, что приведёт к повышению качества и надёжности акустических резонаторов на объёмных акустических волнах. Это может способствовать разработке новых методов контроля и устранения дефектов на ранних стадиях производства таких резонаторов.

Ключевые слова: структурная характеристика, нитрид алюминия, магнетронное распыление, пьезоактивные плёнки.

Для цитирования: Гейдт П. В., Богословцева А. Л. Характеризация напряжений и дефектов в плёнках нитрида алюминия с применением рентгеновских методов и инфракрасной спектроскопии // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 282–283.

P. V. Geydt, A. L. Bogoslovstseva

Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

CHARACTERIZATION OF STRESSES AND DEFECTS IN ALUMINUM NITRIDE FILMS USING X-RAY AND INFRARED SPECTROSCOPY

Abstract. Determining the relationship between mechanical stresses and growth conditions will help to establish the main causes of defects in piezoactive AlN films. Knowledge of the mechanism can be used to optimize AlN film production technologies, which in turn will improve quality and reliability of BAW resonators. The results of the study can contribute to the development of new methods for monitoring and eliminating defects at the early stages of production of such resonators.

Keywords: structural characterization, aluminum nitride, magnetron sputtering, piezoactive films.

For citation: Geydt P. V., Bogoslovstseva A. L. Characterization of stresses and defects in aluminum nitride films using X-ray and infrared spectroscopy // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025 P. 282–283.

Дефекты в пьезоактивном слое акустических резонаторов на объёмных акустических волнах (ОАВ) приводят к снижению ключевых характеристик устройств и снижению технологических характеристик материалов в них. Чтобы снизить количество дефектов, дислокаций, микротрещин, и повысить адгезию плёнок к подложке и слоёв в многослойной структуре между собой, повысить оптические константы в AlN, обеспечить табличную скорость звука в материале, достичь табличного значения пьезокоэффициента бездефектных плёнок и обеспечить другие технологические параметры, которые зависят от совершенства пьезокристалла, необходимо знать механизм влияния условий роста на свойства плёнок. Целью исследования было установить зависимость

между механическими напряжениями в поликристаллических плёнках пьезоактивного нитрида алюминия микронной толщины, возникающими в ходе роста на подложках с различным значением постоянной решётки, выращиваемых при различных температурах и режимах магнетронного напыления. Определение данной зависимости потенциально позволит установить основные причины мехнапряжений и устранить либо минимизировать напряжения и дефекты, улучшив качество резонаторов на ОАВ.

Для изготовления плёнок AlN использовалась вакуумная ростовая камера «СПУТНИК» физического факультета НГУ. Для проведения диагностики плёнок были применены методы синхротронного излучения (СИ), рентгено-фазового анализа (РФА), комбинационного рассеяния света (КРС), рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (РМБ), инфракрасной спектроскопии (ИК-Фурье) в широком диапазоне, спектральной эллипсометрии, энергодисперсионного анализа (ЭДС), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и пьезо-силовой микроскопии (ПСМ).

Результаты исследования комбинации данных РФА и СИ позволили установить, что в образцах имеются растягивающие макронапряжения в выделенном направлении. Комбинация ИК-Фурье и РМБ методов позволила оценить скорость звука и связать её с дефектностью структуры плёнок. ПСМ в перспективе может быть использован как метод оценки пьезокоэффициента d_{33} в плёнках. В ранее проведённых исследованиях нами было показано что КРС также может быть использован для оценки пьезокоэффициента. В докладе будут показаны результаты применения названных методов.

В заключении, отметим, что развитие сопряжения различных диагностических методов должно привести к выбору и дальнейшему применению наиболее адекватного экспрессного метода характеристики структур, который будет использоваться для штатной характеристики плёнок AlN, выращиваемых на производстве.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта государственного задания FSUS-2024-0020 с использованием измерительных приборов ЦКП «ВТАН» НГУ.

Авторы благодарят И. Е. Витошкина, А. П. Завьялова, А. В. Капишникову, В. А. Володина, Н. А. Николаева, О. Н. Шевченко, Д. В. Марина, И. А. Милёхина, С. Ю. Чепкасова и В. Р. Шаяпова за выполнение измерений за приборами и помощь в анализе результатов.

Е. В. Губарева¹, П. А. Пятанова^{1,2}

¹Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

²Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

СОРБЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИОНОВ ХРОМА (III) ИЗ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Аннотация. Изучены закономерности сорбционного извлечения ионов хрома (III) хелатирующими катионитами Purolite (S-930, S-950, S-957) и КУ-2-8 из модельных растворов. Подобраны оптимальные условия извлечения – pH, температура, оптимальное время контакта в статических условиях, перемешивание. Подобран эффективный десорбент и условия десорбции.

Ключевые слова: ионы хрома (III), сорбционное извлечение, катиониты.

Для цитирования: Губарева Е. В., Пятанова П. А. Сорбционное извлечение ионов хрома (III) из сточных вод гальванических производств // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 284–285.

E. V. Gubareva¹, P. A. Pyatanova^{1,2}

¹Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

^{1,2}Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

SORPTION EXTRACTION OF CHROMIUM (III) IONS FROM ELECTROPLATING WASTEWATER

Abstract. The paper studies the regularities of sorption extraction of chromium (III) ions by chelating cation exchangers Purolite (S-930, S-950, S-957) and KU-2-8 from model solutions. The authors consider optimal extraction conditions – pH, temperature, optimal contact time under static conditions, mixing; effective desorbent and desorption conditions.

Keywords: chromium (III) ions, sorption extraction, cation exchangers.

For citation: Gubareva E. V., Pyatanova P. A. Sorption extraction of chromium (III) ions from electroplating wastewater // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025 P. 284–285.

Гальваническое производство – один из наиболее распространённых видов промышленности, производит токсичные отходы, в основном промывные воды, содержащие тяжёлые металлы, например, хром (III). Хром (III), относящийся к веществам III класса опасности, угнетает обменные процессы у растений и может вызывать нарушения в работе внутренних органов у животных и человека. В настоящее время сорбционные ионообменные методы очистки водных растворов считаются одними из наиболее эффективных, экономичных (возможность многократного использования сорбента более 700 раз) и экологически чистых технологий для решения этой проблемы. Поэтому целью нашей работы является изучение закономерностей и потенциала сорбционного извлечения ионов хрома (III) хелатирующими смолами на основе иминодиацетатных

(Purolite S-930), аминофосфонатных (Purolite S-950), фосфоновых и сульфо функциональных групп (Purolite S-957), а также катионите КУ-2-8 обладающим сульфогруппами. Изучение зависимости сорбции ионов хрома во всех экспериментах проводили в статических условиях. Концентрацию ионов хрома в исходных и равновесных растворах определяли обратным комплексометрическим титрованием, основанном на титровании непрореагировавшего избытка стандартного раствора Трилона-Б стандартным раствором соли никеля в присутствии индикатора мурексида в слабощелочной среде. На первом этапе работы устанавливали оптимальные условия для ионообменного извлечения ионов хрома (III). Для подбора оптимального pH была выбрана концентрация исходного раствора 8 г/л, pH исходного раствора изменялось в интервале от 2 до 4,32 единиц, продолжительность сорбции 24 часа. Сорбция максимальна при pH=4,3 для всех смол. Далее подбиралось оптимальное время контакта смолы с исследуемым раствором. Исходные растворы содержали от 2 до 8 г/л хрома, pH=4,3. Время контакта ионита с растворами составило от 3,5,7,9,14,18 и 24 часов. Из полученных зависимостей видно, что равновесие обмена достигается за 5 часов контакта ионита с раствором на всех смолах и не зависит от исходной концентрации раствора. Следующим этапом работы было изучение зависимостей сорбции ионов хрома в подобранных ранее оптимальных условиях, но при разных температурах и при перемешивании раствора для ускорения процесса сорбции. Так как ряд экспериментов установил, что ионообменная смола Purolite S-957 показывает лучшие результаты по сорбции ионов хрома, то изучение зависимости величины сорбции при разных температурах в статических условиях и с перемешиванием при комнатной температуре проводили только для данной смолы из серии зарубежных, а также для смолы российского производства КУ-2-8. Исходный раствор содержал 8 г/л ионов хрома, pH раствора 4,3 единицы. Контроль температуры вели в термостате. Исследования проводили при температурах 23, 43, 63°C. Из полученных данных видно, что с увеличением температуры раствора значения величин сорбции растут для смол, так при температуре 63°C достигаются (Purolite S-957 $a=260,0$ мг/г при $t=63^\circ\text{C}$; КУ-2-8 $a=145,6$ мг/г при $t=63^\circ\text{C}$), также при перемешивании величина сорбции выше, чем без перемешивания в аналогичных условиях.

Для изучения возможности десорбции ионов хрома (III) со смол Purolite S-930, Purolite S-950, Purolite S-957 и катионите КУ-2-8 в качестве элюента нами была выбрана серная кислота в трех разных концентрациях, а именно 15, 30 и 60 г/л. Выбор данных десорбентов был сделан на основе изученных патентов и литературных данных. Ионообменная смола с сорбированными ионами хрома помещалась в мерную колбу и заливалась растворами кислот объемом 25 мл. Десорбция проводилась при температурах 23°C и 63°C, длилась 24 часа. В результате последовательного подбора условий десорбции выявлены оптимальные параметры процесса. Максимальная степень извлечения (98-100%) достигается при нагревании до 63°C в течение 4 часов с применением раствора H_2SO_4 концентрацией 98 г/л в качестве десорбента.

Э. Р. Жданов¹, А. В. Крюков², А. В. Волков², О. С. Харина¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

²АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», Москва, Российская Федерация

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРОСТОЙКИХ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ И ВЫРАВНИВАНИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЧ-ПРИБОРОВ НА ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ

Аннотация. К перспективным современным управляемым посредством радиолокационного наведения летательным аппаратам (ЛА), чьи скорости полета многократно превышают скорость звука, предъявляют высокие требования к радиопрозрачным обтекателям (РПО). РПО обеспечивает защиту антенной системы от аэродинамических факторов, влияет на точность наведения ЛА на цель и является критически важным элементом его конструкции. Применение композитных материалов при изготовлении РПО позволяет обеспечить повышение рабочих температур элементов конструкции ЛА и иных эксплуатационных характеристик с одновременным снижением массы изделия.

Ключевые слова: композитный материал, летательный аппарат, радиопрозрачный обтекатель, радиоэлектронные устройства.

Для цитирования: Жданов Э. Р., Крюков А. В., Волков А. В., Харина О. С. Применение композитных поглотителей для выравнивая амплитудно-частотных характеристик СВЧ-приборов // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 286–287.

E. R. Zhdanov¹, A. V. Kryukov², A. V. Volkov², O. S. Kharina¹

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

²JSC “TsNIRTI named after Academician A. I. Berg”, Moscow, Russian Federation

REVIEW OF THE APPLICATION OF HIGH-TEMPERATURE-RESISTANT RADIO-TRANSPARENT COMPOSITE MATERIALS FOR THE PROTECTION AND ALIGNMENT OF THE AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MICROWAVE DEVICES ON AIRCRAFT

Abstract. Promising modern aircraft controlled by radar guidance (hereinafter referred to as aircraft), whose flight speeds are many times higher than the speed of sound, place high demands on radio-transparent fairings (hereinafter referred to as RTF). RTF protects the antenna system from aerodynamic factors, affects the accuracy of aircraft targeting, and is a critically important element of the aircraft design. The use of composite materials in the manufacture of RTF allows for an increase in the operating temperatures of aircraft design elements and other performance characteristics while simultaneously reducing the weight of the product.

Keywords: composite material, aircraft, radio-transparent fairing, electronic devices.

For citation: Zhdanov E. R., Kryukov A. V., Volkov A. V., Kharina O. S. Review of the application of high-temperature-resistant radio-transparent composite materials for the protection and alignment of the amplitude-frequency characteristics of microwave devices on aircraft // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025 P. 286–287.

Для высокоскоростных ЛА, скорость полета которых превышает 6 М, температура на поверхности защитных обтекателей, выходящих на их внешний обвод, может достигать 600°C и выше. РПО ЛА подвергается экстремальным нагрузкам со стороны набегающего аэродинамического потока и должен обеспечивать защиту антенных систем в течение всего срока эксплуатации (времени полета) не ухудшая свои диэлектрические характеристики.

За рубежом в настоящее время для изготовления РПО широко применяются керамические материалы на основе нитрида кремния (Si_3N_4). Пример - материал IRBAS, изготовленный из нитрида кремния (Si_3N_4). По прочностным характеристикам данный материал превосходит плавленый кварц (диоксид кремния SiO_2), используемый ранее. Диэлектрическая постоянная материала IRBAS относительно стабильна при повышении температуры, однако тангенс угла диэлектрических потерь стремительно растет после 1000°C.

В работе проведен обзор разработанных в России высокотемпературных композитных радиопрозрачных материалов (далее – ВРКМ), способных обеспечить защиту антенной системы ЛА от воздействия внешних температур свыше 600°C, с неизменным тангенсом угла диэлектрических потерь.

Для проведения анализа отечественных КМ, которые могут быть использованы для изготовления РПО высокоскоростных и высокоманевренных ЛА, были выделены КМ на основе неорганических ориентированных тканевых кварцевых, стеклянных и кремнеземных наполнителей, широко применяемые в конструкциях узлов авиационной и ракетной техники. Использование различных сочетаний армирующих и связующих компонентов позволяет создавать материалы с широким диапазоном регулируемых свойств, что предопределяет большое разнообразие сфер применения стеклопластиков.

Один из наиболее распространенных типов композитных материалов, сочетающих высокую прочность, небольшую плотность, хорошие диэлектрические свойства и приемлемую цену составляют стеклопластики. Применение стеклопластиков для изготовления самолетов, ракет и двигателей нового поколения позволяет кардинально снизить массу изделий. Стеклопластики в России широко применяются для изготовления РПО. На основе стекловолокон разработан материал СТМ – К ТУ 2296-719-56897835-2016. На основе кварцевой нити разработан аналог материала СТМ-К материал ВРКМ-01 ТУ 22.21.42.110-001-07509511-2023. Данные материалы представляют собой высокотемпературостойкие радиопрозрачные композитные материалы – ВРКМ, предназначенные для изготовления радиопрозрачных деталей (окон, вставок, обтекателей), работающих (без оплавления) при температурах до 1400°C, и изготавливаемые в форме плит или заготовок в соответствии с согласованной конструкторской документацией. Для получения материалов СТМ-К и ВРКМ-01 используется автоклавный метод. Данный метод менее технологичен из-за ряда недостатков: высокая стоимость оборудования, высокие затраты на электроэнергию, длительность изготовления, зависимость габаритов изделий от габаритов автоклава, высокая пожароопасность (из-за температуры, давления и использования кислорода). В настоящее время проводятся работы по созданию из СТМ-К и ВРКМ-01 готовых деталей, не требующих механической обработки.

Работа выполнена за счёт средств Российского научного фонда (грант № 24-19-00328).

Н. М. Жилин¹⁻³, Т. Н. Улаева¹⁻³, Н. А. Чириков^{1,3}, В. Н. Щекатурова², А. Н. Кузнецов^{1,3}

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская Федерация

²Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

Омск, Российская Федерация

³Омский научный центр СО РАН (Институт радиопизики и физической электроники)

Омск, Российская Федерация

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОАВ-РЕЗОНАТОРА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИММОБИЛИЗОВАННОГО СЛОЯ

Аннотация. Представлены результаты анализа по влиянию чувствительного слоя на основе позитивного фоторезиста ФП-383 на электрические характеристики ОАВ-резонатора с брэгговским отражателем. Для проведения эксперимента были выбраны макеты резонаторов с разной площадью верхнего электрода. Чувствительный слой был сформирован локально методом капельного нанесения, после чего проведены измерения импедансных характеристик, добротности и резонансных частот резонатора.

Ключевые слова: объемная акустическая волна, брэгговский отражатель, сенсор, иммобилизация, чувствительный слой.

Для цитирования: Жилин Н. М., Улаева Т. Н., Чириков Н. А., Щекатурова В. Н., Кузнецов А. Н. Анализ электрических параметров ОАВ-резонатора в условиях воздействия иммобилизованного слоя // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 288–289.

N. M. Zhilin¹⁻³, T. N. Ulaeva¹⁻³, N. A. Chirikov^{1,3}, V. N. Shchekaturova², A. N. Kuznetsov¹

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

³Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

Omsk, Russian Federation

ANALYSIS OF THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A BAW RESONATOR IN THE PRESENCE OF AN IMMOBILIZED LAYER

Abstract. This work reports an analysis of how a sensing layer based on the positive photoresist FP-383 influences the electrical characteristics of a bulk acoustic wave (BAW) resonator with a Bragg reflector. Resonator test structures with varying top-electrode area were used for the experiment. The sensing layer was applied locally by drop-casting, after which the electrical impedance characteristics, quality factor, and resonance frequencies of the resonator were measured.

Keywords: bulk acoustic wave, Bragg reflector, sensor, immobilization, sensing layer.

For citation: Zhilin N. M., Ulaeva T. N., Chirikov N. A., Shchekaturova V. N., Kuznetsov A. N. Analysis of the electrical characteristics of a BAW resonator in the presence of an immobilized layer // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025 P. 288–289.

В настоящее время обеспечение контроля качества атмосферы невозможно без использования датчиков, способных обнаруживать минимальные концентрации опасных веществ в воздухе. Высокая чувствительность этих устройств позволяет фиксировать даже незначительные изменения состава атмосферы. Газовые сенсоры на основе микрорезонаторных ОАВ-резонаторах демонстрируют стабильные характеристики при изменении температурных

условий окружающей среды. Устройства имеют высокую точность, температурную стабильность, легко интегрируются в современные системы мониторинга качества воздуха и снижают экологические риски в городских условиях и на производственных предприятиях.

Применение тонкопленочных технологий обеспечивает компактные и энергоэффективные решения для интеллектуальных систем управления и мониторинга. Одной из эффективных конструкций является ОАВ-резонатор с брэгговским отражателем, обладающий высокой механической прочностью, температурной стабильностью и низкой чувствительностью к механическим воздействиям. Несмотря на значительный прогресс в создании сенсоров, остается нерешенной задача надежной фиксации чувствительного материала при одновременном обеспечении высокой чувствительности и селективности.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа электрических характеристик ОАВ-резонаторов с разной площадью верхнего электрода до и после нанесения чувствительного слоя.

Макеты ОАВ-резонаторов изготовлены методом магнетронного распыления. Конструкция резонатора включает брэгговский отражатель на основе трех пар слоев молибдена-алюминия и одной пары молибдена-диоксида кремния, пьезоэлектрический преобразователь на основе пьезоэлектрической пленки нитрида алюминия с толщиной $\approx 0,9$ мкм, расположенной между двумя пленочными алюминиевыми электродами.

Чувствительный слой сформирован локально методом капельного нанесения, что обеспечивает простоту реализации и воспроизводимость. Метод не требует дорогостоящего оборудования, легко реализуется в лабораторных условиях, совместим с чувствительными материалами, а также позволяет нанести раствор строго в пределах рабочей области резонатора. После нанесения образцы выдерживались в термощкафу при температуре 60 °С в течение 3 часов для отверждения и повышения адгезии к резонатору, затем стабилизировались при комнатной температуре в течение 30 минут.

В качестве чувствительного слоя использован позитивный фоторезист марки ФП-383, выбранный за счет высокой адгезии к металлическим поверхностям, минимальных требований подготовки поверхности, повышенной вязкости, стабильных механических и диэлектрических параметров. Фоторезист имеет чувствительность к ряду органических растворителей и газов, включая ацетон, этанол, аммиак, формальдегид, пары воды и другие летучие органические соединения. Следует отметить, что изменяемость диэлектрических и механических параметров фоторезиста при сорбции влияет на параметры резонатора, в первую очередь, на сдвиг резонансной частоты и добротность.

Электрические характеристики образцов резонаторов до и после нанесения чувствительного слоя измерялись при помощи векторного анализатора электрических цепей E5071C Agilent Technologies. Установлено, что наличие фоторезиста на верхнем электроде приводит к снижению частоты последовательного и параллельного резонанса (в среднем на 20 МГц), уменьшению резонансного промежутка более чем в 1,5 раза, при этом добротность резонатора увеличивается на 30%. Также наблюдается снижение максимальной активной проводимости (в 4 раза) и значения коэффициента отражения S_{11} (в 4 раза) на частоте последовательного резонанса. Это указывает на дополнительный вклад потерь в чувствительном слое, связанных с его диэлектрическими и поверхностными свойствами, что требует дальнейшего изучения. Статическая емкость практически не изменилась, что подтверждает сохранение базовой структуры резонатора.

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность применения позитивного фоторезиста в качестве чувствительного слоя.

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

И. С. Кеда¹, О. А. Доценко^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
Томск, Российская Федерация

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Томск, Российская Федерация

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКРИЛОВЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Аннотация. Представлены результаты исследования частотной зависимости диэлектрической проницаемости композиционных материалов на основе многостенных углеродных нанотрубок с помощью конденсаторного метода. Проведено сравнение действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости исследуемых образцов, изготовленных при различной длительности ультразвуковой обработки с разными мощностями.

Ключевые слова: нанотрубки, композит, ультразвуковая обработка, диэлектрическая проницаемость, конденсаторный метод.

Для цитирования: Кеда И. С., Доценко О. А. Электрофизические характеристики акриловых композитов на основе многостенных углеродных нанотрубок // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 290–291.

I. S. Keda¹, O. A. Dotsenko²

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF ACRYLIC COMPOSITES BASED ON MULTI-WALL CARBON NANOTUBES

Abstract. This paper presents the results of the study of the frequency dependence of the permittivity of composite materials based on multi-wall carbon nanotubes using the capacitor method. A comparison was made of the real and imaginary parts of the permittivity of the studied samples, produced with different durations of ultrasonic treatment with different powers.

Keywords: nanotubes, composite, ultrasonic treatment, dielectric constant, capacitor method.

For citation: Keda I. S., Dotsenko O. A. Electrophysical characteristics of acrylic composites based on multi-wall carbon nanotubes // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025 P. 290–291.

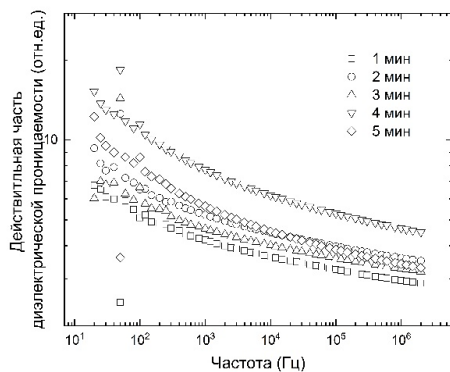
Современные радиотехнические устройства работают в широком диапазоне частот. Для снижения уровня электромагнитного загрязнения применяются различные подходы, например, экранирование излучающих радиокомпонентов, ограничение мощности и рабочего диапазона частот устройств и другие. Одним из вариантов снижения уровня электромагнитного излучения в помещении являются безэховые камеры. Безэховые камеры, используемые на основе пирамидальных структур, весьма громоздки. Использование ферритовых поглотителей увеличивает их вес и стоимость. Имеются публикации, в которых исследуются поглощающие материалы, наполненные различными типами углеродных нанотрубок.

Для изготовления образцов использовались акриловая краска и углеродные нанотрубки. Были изготовлены композиты с концентрацией многостенных углеродных

нанотрубок 0,5 мас. %. Сначала все компоненты смеси взвешивались по отдельности на аналитических весах SHIMADZU AUX320, затем все помещалось в стеклянную емкость и перемешивалось вручную. После этого смесь подвергалась ультразвуковой обработке на установке Alena UZTA0.1\28-0 с излучателем иммерсионного типа в диапазоне 1–5 минут с шагом 1 минута. Мощности ультразвука составляли 25 Вт и 40 Вт соответственно. После ультразвуковой обработки полученная смесь наносилась на ровную поверхность в 5 слоев до засыхания. Электромагнитные параметры образцов измерялись конденсаторным методом на установке E8363B фирмы Agilent Technologies.

На рис. 1а, б и 2а, б приведены частотные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости образцов, диспергированных при мощностях ультразвуковой обработки 25 Вт и 40 Вт. Видно, что увеличение мощности ультразвуковой обработки приводит к увеличению значений комплексной диэлектрической проницаемости при одинаковых длительностях времени воздействия, причем на низких частотах величины отличаются на несколько порядков. Частотный ход кривых указывает на наличие разных механизмов проводимости у изготовленных образцов.

а



б

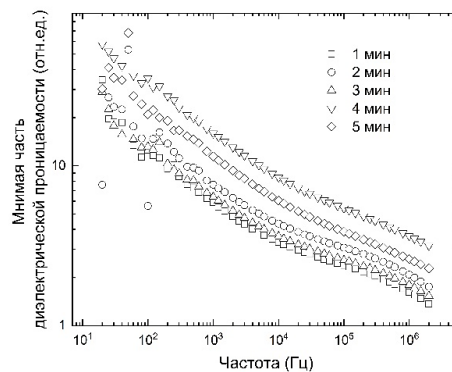
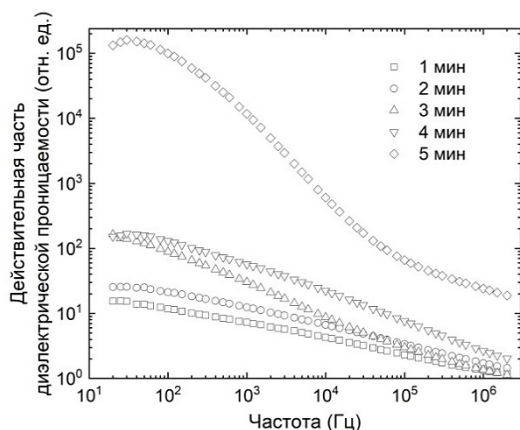


Рис. 1. Действительная (а) и мнимая (б) части диэлектрической проницаемости при мощности 25 Вт

а



б

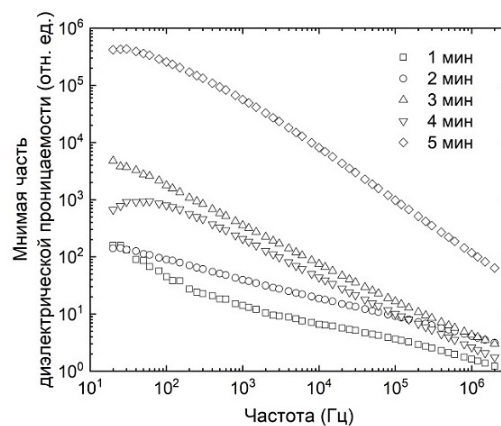


Рис. 2. Действительная (а) и мнимая (б) части диэлектрической проницаемости при мощности 40 Вт

Таким образом, исследование показало, что изменение мощности ультразвуковой обработки приводит к различающейся внутренней структуре изготовленных образцов композиционных покрытий.

В. С. Ковивчак¹, А. Витершпан²

¹Омский научный центр СО РАН (Институт радиопизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

²Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

НАГРЕВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОДЛОЖКИ ПРИ МАГНЕТРОННОМ ОСАЖДЕНИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Аннотация. Температура поверхности подложки при осаждении различных тонких пленок играет существенную роль как в формирование ее кристаллической структуры, так и морфологии поверхности. Особенно это важно при получении кристаллических тонких пленок нитридов и оксидов, которые используются в качестве активных элементов различных приборов (например, резонаторы и фильтры на объемных и поверхностных акустических волнах). Источником дополнительного нагрева поверхностного слоя подложки является энергия конденсации осаждаемых атомов (молекул), энергия ионов (электронов), падающих на подложку, и излучение плазмы магнетронного разряда. Рассмотрен вклад этих компонент в нагрев поверхностного слоя подложки при осаждении тонких металлических пленок при магнетронном осаждении. Обсуждены особенности нагрева поверхностного слоя при реактивном магнетронном осаждении тонких пленок оксидов и нитридов металлов, когда добавляется еще теплота химических реакций.

Ключевые слова: магнетронное распыление, тонкие пленки, нагрев поверхности подложки.

Для цитирования: Ковивчак В. С., Витершпан А. Нагрев поверхностного слоя подложки при магнетронном осаждении тонких пленок // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 292–293.

V. S. Kovivchak¹, A. Viterishpan²

¹Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
Omsk, Russian Federation

²Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

HEATING OF THE SURFACE LAYER OF THE SUBSTRATE DURING MAGNETRON DEPOSITION OF THIN FILMS

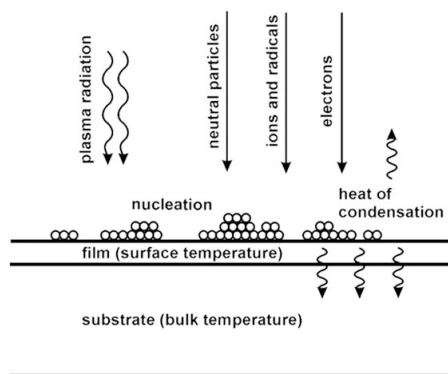
Abstract. The surface temperature of the substrate during the deposition of various thin films plays a significant role both in the formation of its crystal structure and surface morphology. This is especially important in the production of crystalline thin films of nitrides and oxides, which are used as active elements of various devices (for example, resonators and filters based on bulk and surface acoustic waves). The source of additional heating of the surface layer of the substrate is the condensation energy of deposited atoms (molecules), the energy of ions (electrons) incident on the substrate, and the radiation from the plasma of a magnetron discharge. The paper considers the contribution of these components to the heating of the surface layer of the substrate during the deposition of thin metal films using magnetron deposition. The paper also discusses the peculiarities of the surface layer heating during reactive magnetron deposition of thin films of metal oxides and nitrides, when heat is added by chemical reactions.

Keywords: magnetron sputtering, thin films, heating of the substrate surface.

For citation: Kovivchak V. S., Viterishpan A. Heating of the surface layer of the substrate during magnetron deposition of thin films // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October

7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIP, 2025 P. 292–293.

Свойства тонкой пленки, нанесенной на подложку, определяются двумя ее характеристиками – химическим составом и структурой, которые зависят от элементного состава и энергии частиц, поступающих на поверхность подложки. К источникам энергии, которая поступает на поверхность подложки при магнетронном нанесении пленок и вызывает повышение температуры поверхности в процессе роста пленки, можно отнести: экзотермическое выделение теплоты при конденсации осаждаемых атомов (теплота конденсации), кинетическая энергия распыленных атомов, кинетическая энергия различных частиц (заряженных и нейтральных) рабочих газов, бомбардирующих поверхность подложки, излучение плазмы. Схематическая иллюстрация потоков энергии к поверхности растущей пленки при магнетронном распылении показана на рисунке. Кроме указанных выше источников энергии, существует еще один, который характерен для реактивного магнетронного нанесения пленок – теплота химических реакций, выделяющаяся при нанесении пленок оксидов, нитридов и т.д. Очевидно, что эта энергия может влиять на температуру подложки только в случае, если реакция между компонентами при формировании пленок этих соединений происходит на поверхности подложки.



Схематическая иллюстрация потоков энергии к поверхности растущей пленки при магнетронном распылении

На основе литературных данных на примере нитрида титана (TiN) рассмотрены возможные механизмы формирования пленок при трех режимах магнетронного распыления (Ti в N_2 , TiN в Ar, TiN в N_2) и оценены энергетические эффекты для них. Очевидно, что существует только три возможных комбинации типа пленкообразующих частиц, которые полностью определяют состав и структуру пленки TiN: атомы Ti и N; молекулы TiN; комбинация атомов Ti, N и молекул TiN. Рассмотрены возможные химические реакции при осаждении пленки и оценена энергия, которая может быть выделена на поверхности подложки при каждом режиме магнетронного распыления. Следует отметить, что при использовании для реактивного магнетронного распыления смеси $Ar+N_2$ могут реализовывать все три механизма (с разным соотношением), что существенно усложняет оценки выделения энергии на подложке. Для TiN экспериментально оцененная разность температуры поверхности подложки (поверхности конденсации) и объема подложки может достигать $\sim 250^\circ C$.

Таким образом, для получения высококачественных кристаллических тонких пленок нитридов и оксидов требуется учитывать повышение температуры поверхности конденсации в процессе реактивного магнетронного осаждения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 124022500291-6) с использованием оборудования Омского регионального центра коллективного пользования СО РАН.

С. С. Коломоец

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО КЛЕЯ В ПРОЦЕССЕ СТАРЕНИЯ

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния температурных режимов на электрические характеристики токопроводящего клея в процессе старения. Изучено воздействие различных температур сушки (150 °C и 170 °C) и отжига (160 °C и 190 °C) на изменение электрического сопротивления клеевого соединения. Достигнутые результаты демонстрируют важность точного контроля температурных режимов при обработке токопроводящего клея и позволяют рекомендовать режим отжига 190 °C как более эффективный с точки зрения достижения стабильных электрических характеристик в кратчайшие сроки.

Ключевые слова: токопроводящий клей, электрическое сопротивление, температура отжига, старение.

Для цитирования: Коломоец С. С. Исследование электрического сопротивления токопроводящего клея в процессе старения // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 294–296.

S. S. Kolomojets

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

STUDY OF THE ELECTRICAL RESISTANCE OF CONDUCTIVE ADHESIVE DURING AGING

Abstract. This paper presents the results of a study of the effect of temperature conditions on the electrical characteristics of a conductive adhesive during the aging process. The author studies the effect of different drying temperatures (150 °C and 170 °C) and annealing temperatures (160 °C and 190 °C) on the change in the electrical resistance of the adhesive joint. The achieved results demonstrate the importance of precise temperature control when using conductive adhesive and allow us to recommend the 190 °C annealing mode as more effective in terms of achieving stable electrical characteristics in the shortest possible time.

Keywords: conductive adhesive, electrical resistance, annealing temperature, aging.

For citation: Kolomojets S. S. Study of the electrical resistance of conductive adhesive during aging // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025 P. 294–296.

Введение

В настоящее время при изготовлении кварцевых резонаторов в качестве материала для крепления пьезоэлемента к держателю или корпусу, применяют эпоксидные клеи. Основные требования к таким клеям: электропроводность, прочность соединения, минимальные механические напряжения, стабильность во времени. В качестве токопроводящего клея используют ТОК-2. Сопротивление электрического контакта на основе токопроводящего клея зависит от состава и условия применения. Токопроводящие клеи обеспечивают электрический контакт между соединяемыми материалами, поэтому для получения клея со стабильными характеристиками по электропроводности, в его состав добавляют порошок никеля или мелкодисперсного серебра, палладия или

даже золота. Широкое распространение в пьезотехнике получили токопроводящие клеи с наполнителем в виде серебряного порошка на основе эпоксидной смолы.

Подобно другим материалам, токопроводящий клей со временем теряет свои первоначальные свойства – происходит деградация его электрофизических характеристик и качества создаваемого электрического соединения. В процессе эксплуатации для высокостабильных кварцевых резонаторов, работающих более 25 лет, изменение сопротивления электрического контакта на основе токопроводящего клея может привести к серьезным последствиям.

Целью доклада является оценка влияния температурных отжигов (старения) на изменение сопротивления контактного соединения.

Описание эксперимента

В данной работе для исследования изменения сопротивления электрического контакта, образованного токопроводящим клеем, были изготовлены образцы. Данные образцы состояли из поликоровой подложки с нанесёнными на неё контактными площадками. Одни контактные площадки покрывались слоем никеля, а другие слоем серебра. На рис. 1 представлена схематический вид образца. Здесь при помощи контактной сварки к контактной площадке крепилась золотая проволока в качестве проводника диаметром 50 мкм. Далее другой конец проволоки помещался на контактной площадке и крепился при помощи токопроводящего клея ТОК-2. Производилась сушка токопроводящего клея согласно техническим условиям эксплуатации клея. В одном случае, 4 часа при температуре 150 °С, в другом – 2 часа при температуре 170 °С. Далее проводилось искусственное старение. Образцы отжигались при температурах 160 °С и 190 °С в течение 104 часов. Далее производилось измерение сопротивления при помощи вольтметра В7-27.

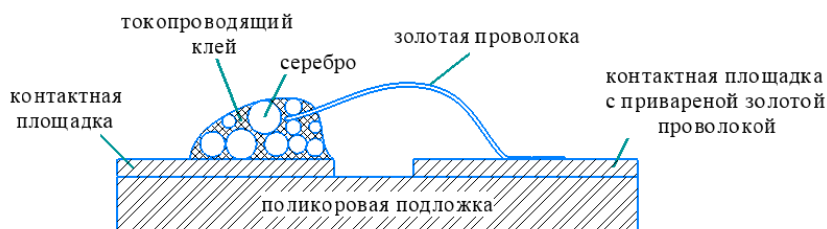


Рис. 1. Схематический вид образца

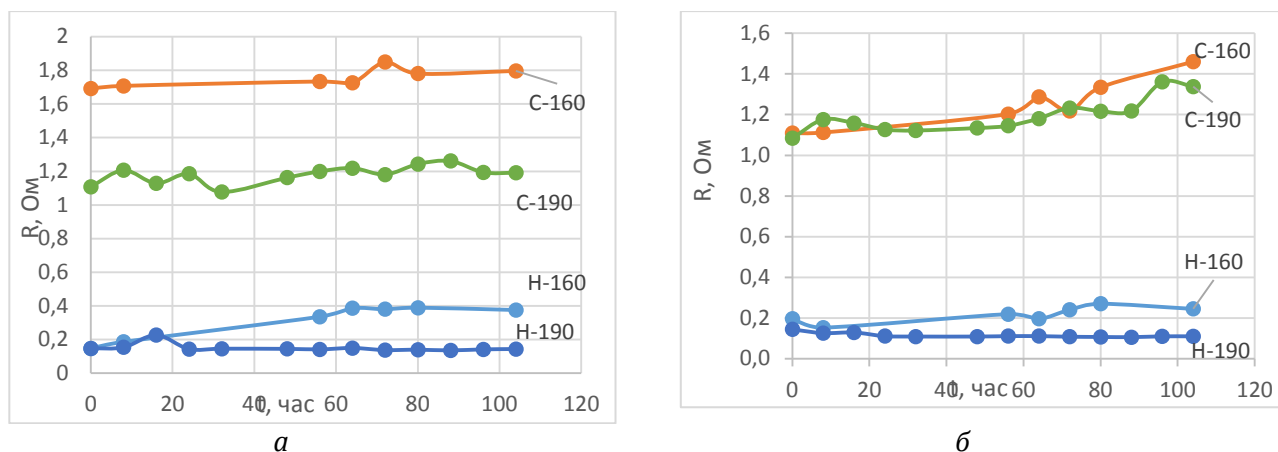


Рис. 2. Изменение сопротивления контакта, образованного токопроводящим клеем ТОК-2:

а) сушка клея 2 часа – 170 °С; б) сушка клея 4 часа – 150 °С

На рис. 2 представлены графики изменения сопротивления электрического контакта для образцов с клеем ТОК-2, в случае: а) сушка клея 2 часа при температуре 170 °С, в случае б) сушка клея 4 часа при температуре 150 °С, отжиг соответственно 104 часа.

Из графиков видно, что сопротивление образцов напыленных никелем в среднем составляет 0,2 Ом, в то время как сопротивление образцов напыленных серебром – 1,8 Ом. Установлено, что температурный режим играет ключевую роль в формировании электрических характеристик клеевого соединения. При сравнении режимов сушки выявлено, что температура 170 °С обеспечивает более низкое электрическое сопротивление клеевого соединения по сравнению с режимом 150 °С, что может быть обусловлено более эффективным процессом полимеризации при повышенной температуре. Также для образцов напыленных никелем, при сушке клея 170 °С и 150 °С и при отжиге 190 °С, сопротивление электрического контакта становится стабильным после 20 часов отжига, в то время как при отжиге 160 °С стабильность сопротивления электрического контакта наблюдается после 60-70 часов отжига. Это говорит о том, что 190 °С является наиболее оптимальной температурой отжига.

Заключение

В заключение можно сделать вывод, что температурный режим отжига оказывает существенное влияние на стабильность электрических характеристик клеевого соединения. При температуре 190 °С сопротивление электрического контакта достигает уже через 20 часов отжига, что значительно эффективнее по сравнению с режимом 160 °С, где аналогичная стабильность наблюдается после 60 часов отжига. Также исследование процессов сушки клея при температурах 170 °С и 150 °С позволило определить, что сопротивление электрического контакта при температуре 170 °С значительно ниже, чем при температуре 150 °С.

Полученные результаты демонстрируют важность точного контроля температурных режимов при обработке токопроводящего клея и позволяют рекомендовать режим отжига 190 °С как более эффективный с точки зрения достижения стабильных электрических характеристики в кратчайшие сроки.

И. А. Корж

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ С НИЗКИМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК Al/Ni, Al/Ti

Аннотация. Приведена технология получения многослойных пленок Al/Ni и Al/Ti, позволяющих изготавливать на их основе тонкопленочные резисторы с минимальным поверхностным сопротивлением от 0,05 Ом/квадрат и температурным коэффициентом сопротивления до $+460 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ для Al/Ni и до $8000 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ для Al/Ti.

Ключевые слова: тонкопленочный резистор, многослойная энергетическая пленка Al/Ni и Al/Ti.

Для цитирования: Корж И. А. Исследование тонкопленочных резисторов с низким поверхностным сопротивлением на основе многослойных пленок Al/Ni, Al/Ti // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 297–299.

I. A. Korzh

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF THIN-FILM RESISTORS WITH LOW SURFACE RESISTANCE BASED ON MULTILAYER Al/Ni, Al/Ti FILMS

Abstract. The paper presents a technology for producing multilayer Al/Ni and Al/Ti films, which makes it possible to manufacture thin-film resistors based on them with a minimum surface resistance of 0.05 ohms/square and a temperature coefficient of resistance up to $+460 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ for Al/Ni and up to $8000 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ for Al/Ti.

Keywords: thin-film resistor, multilayer Al/Ni and Al/Ti energy film.

For citation: Korzh I. A. Investigation of thin-film resistors with low surface resistance based on multilayer Al/Ni, Al/Ti films // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 297–299.

В микроэлектронике широко используются тонкопленочные резисторы на основе различных тугоплавких металлов типа нихром (20%Ni+80%Cr), тантала Ta, нитрида тантала TaN, титана Ti, сплавов хрома с кремнием (резистивные сплавы марок РС3710, РС 5402 и т.п.). Одним из основных параметров тонкопленочных резисторов является поверхностное сопротивление $R_{\text{квадрат}}$, позволяющее проектировать резисторы с заданным сопротивлением. Поверхностное сопротивление зависит от толщины пленки и удельного объемного сопротивления и определяется по формуле $R_{\text{кв}} = \rho/d$, где ρ – удельное объемное сопротивления материала резистивной пленки, d – толщина пленки. Типичные значения поверхностного сопротивления резистивных пленок от 5 Ом/квадрат до нескольких сотен и тысяч Ом/квадрат. Для некоторых применений в микроэлектронике требуются резисторы со сверхнизким номиналом от 0,05 до 0,5 Ом, и выше приведенные материалы не подходят для этих целей, так как необходимо, чтобы

поверхностное сопротивление было (0,05-0,5) Ом/квадрат. Такие резисторы необходимы для изготовления резистивных мостиков пиротехнических воспламенителей.

Цель работы – разработка тонкопленочных резисторов с низким значением поверхностного сопротивления и исследование их электрических свойств, в первую очередь ТКС и значение максимальной рабочей температуры.

Тантал, широко используемый для изготовления тонкопленочных резисторов, имеет удельное объемное сопротивление 0,124 мкОм·м и при толщине пленки в 1 мкм поверхностное сопротивление составит 0,124 Ом/квадрат, а для получения поверхностного сопротивления 0,05 Ом/квадрат, толщину пленки надо увеличивать в 3 раза – до 3 мкм. При этом возникают трудности с химическим травлением таких пленок при получении заданной конфигурации методами фотолитографии. А также с большими механическими напряжениями в системе подложка-пленка, что приводит к шелушению слоев. Резистивные пленки титана имеют объемное сопротивление 0,47 мкОм·м и для получения поверхностного сопротивления 0,05 Ом/квадрат толщина пленки составит 10 мкм.

Предлагается использовать для получения тонкопленочных резисторов с низким поверхностным сопротивлением многослойные пленки Al/Ni и Al/Ti. Пленки алюминия имеют низкое значение удельного объемного сопротивления 0,0265 мкОм·м и во взаимодействии с пленками никеля и титана позволяют получать резистивные пленки также с низким значением поверхностного сопротивления. Эти пленки обладают эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) – при пропускании определенного тока происходит СВС реакция с выделением большого количества тепла и высокой температуры (от 1300 до 4000 °С). Это делает их привлекательными для создания пиротехнических воспламенителей. Многослойные пленки Al/Ni и Al/Ti получали магнетронным распылением соответствующих мишеней на вращающуюся карусель с подложками.

На рис. 1 приведена зависимость поверхностного сопротивления пленок Al/Ti от толщины.

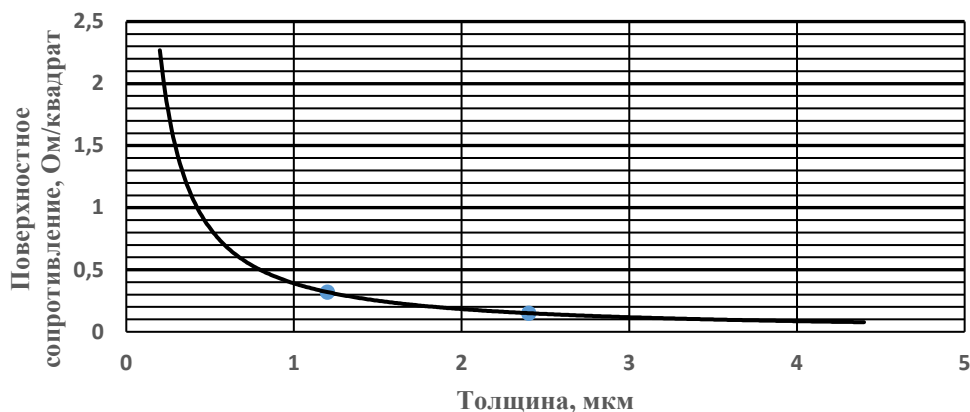


Рис. 1. Зависимость поверхностного сопротивления многослойных пленок Al/Ti от толщины при толщине бислоя 60 нм

Из рис. 1 следует, что толщина пленки Al/Ti для получения поверхностного сопротивления 0,05 Ом/квадрат должна составлять 4,5-5 мкм. Многослойная пленка Al/Ti обладает эффектом СВС и при ее толщине более 3 мкм при нанесении на теплоизолирующую пленку, например, из фоторезиста или полиимида, обладающих низкой теплопроводностью (менее 0,2 Вт/м·К), пленка при пропускании достаточного тока может вспыхнуть. При нанесении пленки на теплопроводную подложку, например, из керамики пленка не вспыхивает.

На рис. 2 приведена зависимость поверхностного сопротивления пленок Al/Ni от толщины.

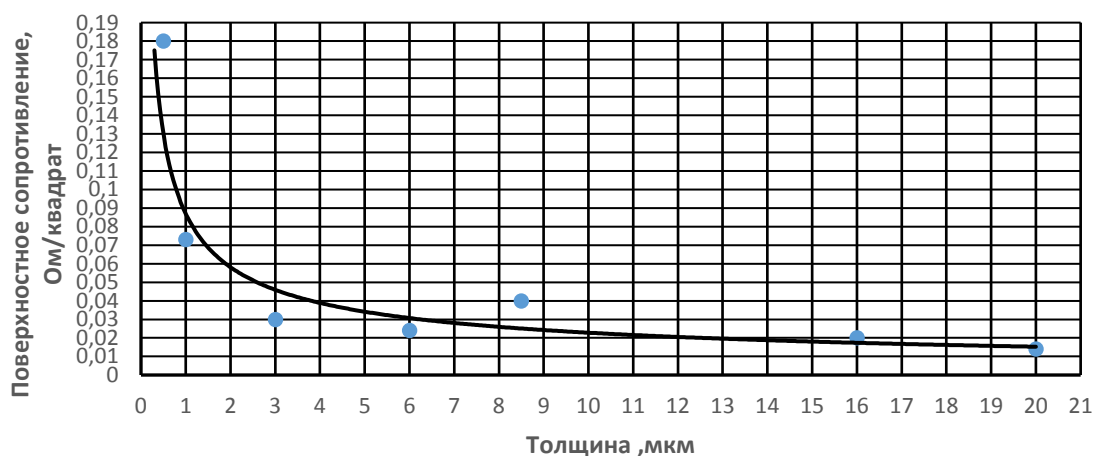


Рис. 2. Зависимость поверхностного сопротивления многослойных пленок Al/Ni от толщины при толщине бислоя 50 нм

Из рис. 2 следует, что поверхностное сопротивление 0,05 Ом/кв. получается при толщине пленки в 2,5 мкм. По сравнению с пленкой Al/Ti требуется в 2,5-3 раза меньшая толщина, что обусловлено более низким удельным объемным сопротивлением никеля по сравнению с титаном.

Измерялись ТКС пленок на тестовых резисторах по следующей методике. На контактные площадки тонкопленочного резистора подавалось напряжение, измерялись ток и температура поверхности резистора. Температура измерялась бесконтактным способом при помощи оптического пирометра с точностью до 0,1 °C. Нас больше всего интересовал ТКС в положительной области температур, так как предполагалось использовать тонкопленочные резисторы для изготовления резистивных мостиков с током покоя до 2А. Сопротивление резисторов рассчитывалось по формуле $R=U/I$. ТКС определялся по формуле $\alpha=\Delta R/\Delta T \cdot R_0$. Здесь $\Delta R=R_T-R_0$ изменение сопротивления от начального R_0 до конечного R_T при изменении температуры на ΔT .

Получены нелинейные зависимости изменения сопротивления от температуры для двух номиналов резисторов из Al/Ni толщиной 5 мкм. То есть ТКС пленок изменялся. По-видимому, это связано с отжигом пленок. При температуре более 140-160 °C зависимости становятся линейными. Для резистора Al/Ni с более высоким начальным сопротивлением $\alpha=+460 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, для резистора с более низким начальным сопротивлением $\alpha=+304 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Для резистора Al/Ti $\alpha=8000 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Максимальная рабочая температура составляла около 200°C.

Заключение

Получены резистивные пленки на основе многослойных пленок Ti/Al и Ni/Al с низким поверхностным сопротивлением от 0,02 Ом/кв. до 0,15 Ом/кв. для пленки Ni/Al и до 0,8 Ом/кв. для пленки Ti/Al при толщине обеих пленок 5 мкм. ТКС пленок положительный и равен до $+460 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ для Al/Ni и до $8000 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ для Al/Ti. Рабочая температура резисторов около 200°C.

И. А. Корж

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

КОНСТРУКЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЕЙ С ЗАЩИТОЙ ОТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Аннотация. Рассмотрены конструкции энергетических воспламенителей с защитой от электростатического электричества. Для изготовления энергетических пиротехнических воспламенителей с защитой от электростатического разряда рекомендованы конструкции, приведенные в патентах US5905226 и US7089861.

Ключевые слова. Энергетические воспламенители, электростатический разряд, конструкции с защитой от ЭСР, энергетическая пленка с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Для цитирования: Корж И. А. Конструкции энергетических воспламенителей с защитой от электростатического электричества // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 300–302.

I. A. Korzh

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

DESIGNS OF ENERGY IGNITORS WITH PROTECTION FROM ELECTROSTATIC ELECTRICITY

Abstract. The paper considers the designs of energy igniters with protection from electrostatic electricity. The designs described in patents US5905226 and US7089861 are recommended for manufacture of energy pyrotechnic igniters with protection from ESD.

Keywords: Energy igniters, electrostatic discharge, designs with protection from ESD, energy film with the effect of self-propagating high-temperature synthesis (SHS).

For citation: Korzh I. A. Designs of energy igniters with protection from electrostatic electricity // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 300–302.

Типичная конструкция микроселектронного энергетического воспламенителя представляет собой керамическую плату с размерами от 0,5х0,5 мм до 4х4 мм, смонтированную на основание корпуса с двумя выводами в виде штырьков. На плате размещен пленочный резистивный мостик (пленки тантала, титана, платины, нихрома и т.п.) с заданным электрическим сопротивлением (обычно от единиц Ом до десятков Ом). На поверхности резистивного мостика располагается энергетическая пленка с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). При подаче тока на резистивный мостик происходит его вспышка и вспышка СВС пленки с выделением большого количества теплоты и температуры (более 3000 °С).

Основными параметрами таких энергетических воспламенителей являются: величина безопасного тока, обычно 0,1-0,2А; ток срабатывания (1А и более); время срабатывания (от нескольких мкс до десятков мс); способ подрыва (конденсаторный подрыв или от источника тока при определенной длительности воздействия).

В последнее время к энергетическим воспламенителям стали предъявляться требования на устойчивость к электростатическим разрядам. При воздействии электростатических разрядов на энергетический воспламенитель он не должен срабатывать. Для радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) разработано оборудование и методы проверки на устойчивость к электростатическим разрядам и элементы для ее защиты от их воздействия. В работе «Компоненты и технологии, 2021, №3,22-27» подробно рассмотрены вопросы проведения испытаний на устойчивость к электростатическим разрядам. Также вопросы испытания РЭА к воздействию электростатического разряда отражены в ГОСТ 30804.4.2-2013. Однако каким образом проводить испытания энергетических воспламенителей не совсем понятно. По ГОСТ установлены следующие типы воздействий электростатического разряда (ЭСР): воздушный разряд и контактный разряд. Также существует разделение воздействия ЭСР на прямое и не прямое.

Цель работы рассмотреть конструкции энергетических воспламенителей с защитой от электростатического электричества.

Упрощенная схема испытательного генератора показана на рис. 1.

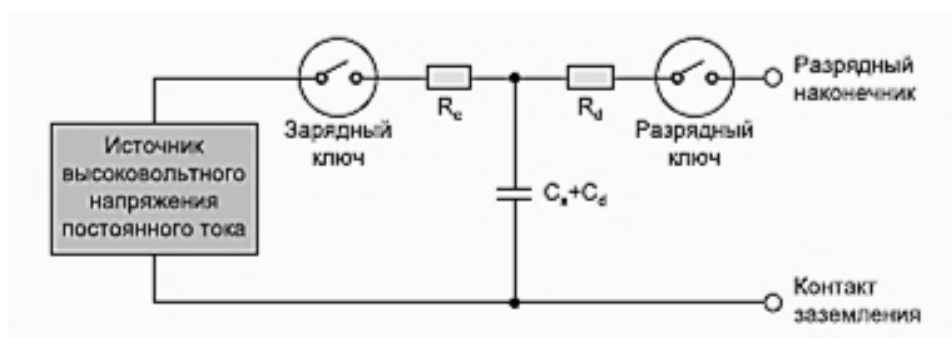


Рис. 1. Упрощенная схема испытательного генератора

Здесь C_d – распределенная емкость между испытательным генератором и его окружением. Значение $C_d + C_s$ должно быть равно 150 пФ. Значение R_c должно быть равно 330 Ом.

В патенте US4708060 описаны несколько методов защиты от ЭСР пиротехнических воспламенителей. Один из вариантов осуществления изобретения включает слой кремния с высокой степенью легирования на сапфировой подложке. Металлизированные пластины покрывают большую часть кремниевого слоя, оставляя открытой только соединительную перемычку (резистивный мостик). Подложка установлена на керамическом коллекторе, имеющем два проходящих через нее электрических провода, расположенных на расстоянии друг от друга и соединенных припоем с пластинами. Металлическая оболочка окружает коллектор и удерживает взрывчатый порошок в контакте с перемычкой. Благодаря особому расположению размеров и материалов, описанных в данном документе, устройство очень устойчиво к случайному разряду, вызванному статическим электричеством или другим непреднамеренным напряжением, подаваемым на проводники.

В патенте US5027707 предложен электрозапал, в котором используется пиротехническая смесь с внутренней электропроводностью и который улучшен за счет добавления слоя углерода между внутренним и внешним электродами и смесью. Слой углерода обеспечивает параллельный резистивный путь тока между электродами в дополнение к пути, проходящему через проводящую смесь. Добавление углеродного слоя также увеличивает рабочий температурный диапазон воспламенителя. Высокий порог

воспламенения пиротехнической смеси, обладающей внутренней электропроводностью, и дополнительный рассеивающий ток, проходящий через слой углерода, взаимодействуют, что еще больше снижает чувствительность воспламенителя к радиочастотному излучению и электростатическим воздействиям. В патенте US6289813 описан пиротехнический воспламенитель, предназначенный для обеспечения безопасности автомобилей. Воспламенители согласно изобретению, имеют тонкопленочный резистивный мостик, соединенный через две тонкие металлические области с двумя электродами. Иницирующий лак покрывает резистивный мостик, а варистор, прикрепленный к указанным участкам, защищает воспламенитель от электростатических разрядов. Резистивный мостик имеет объемное удельное сопротивление от $0,5 \times 10^6$ Ом·м до 2×10^6 Ом·м, а иницирующий лак изготовлен из первичного взрывчатого вещества. Запальные устройства имеют ток холостого хода более 500 мА и ток подрыва менее 1200 мА.

В патенте US5905226 представлено электровзрывное 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 подрыве 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 (рис. 2).

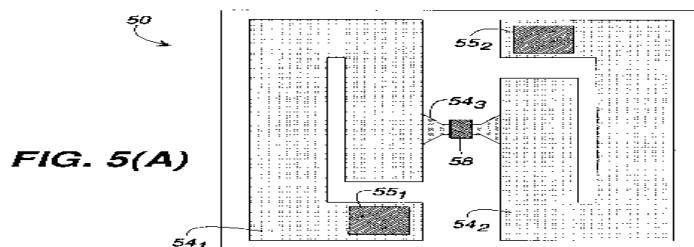


Рис. 2. Конструкция воспламенителя с защитой от ЭСР (US5905226):

541 и 542 – резисторы из пленки алюминия с сопротивлением 10-20 Ом;
543 – мостик с сопротивлением 0,3 Ом; 58 – пленка циркония, толщиной 1 мкм

Патент US7089861 предлагает нагревательный элемент для воспламенения пиротехнического заряда, например, для приведения в действие подушки безопасности, который обладает повышенной устойчивостью к кратковременным импульсам и электростатическому разряду в результате выбора определенной массы, определенного удельного сопротивления и удельной теплоемкости. В частности, масса составляет от $1,0 \times 10^{-9}$ кг до $4,0 \times 10^{-9}$ кг, удельное сопротивление составляет от 1×10^{-6} до 2×10^{-6} Ом·м, а удельная теплоемкость составляет от 100 до 400 Вт/(кг·К).

Для изготовления энергетических пиротехнических воспламенителей привлекательными являются последние две рассмотренные конструкции (патенты US5905226 и US7089861).

Заключение

Рассмотрены конструкции энергетических воспламенителей с защитой от ЭСР. Рекомендованы конструкции, описанные в патентах US5905226 и US7089861.

И. А. Корж, В. В. Вареник, Ю. С. Зонова

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ СРАБАТЫВАНИЯ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОСПЛАМЕНИТЕЛЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ РЕЗИСТИВНОГО МОСТИКА

Аннотация. Исследовано время срабатывания пиротехнического энергетического воспламенителя от величины тока инициирования, конструкции резистивного мостика. Получено минимальное время срабатывания 4-5 мс, что удовлетворяет предъявляемым требованиям к таким воспламенителям.

Ключевые слова: пиротехнический энергетический воспламенитель, многослойная энергетическая пленка, резистивный мостик, пленки титана, тантала и нитрида тантала, время срабатывания мостика.

Для цитирования: Корж И. А., Вареник В. В., Зонова Ю. С. Определение времени срабатывания пиротехнического энергетического воспламенителя от параметров резистивного мостика // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7-8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 303–305.

I. A. Korzh, V. V. Varenik, Yu. S. Zonova

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

DETERMINATION OF THE TIME OF FIRE OF A PYROTECHNIC ENERGY IGNITOR FROM THE PARAMETERS OF A RESISTIVE BRIDGE

Abstract. The response time of a pyrotechnic energy igniter has been studied as a function of the initiation current and the design of the resistive bridge. The minimum response time obtained is 4-5 ms, which meets the requirements for such igniters.

Keywords: pyrotechnic energy igniter, multilayer energy film, resistive bridge, titanium, tantalum and tantalum nitride films, the time of the bridge operation.

For citation: Korzh I. A., Varenik V. V., Zonova Yu. S. Determination of the time of fire of a pyrotechnic energy ignitor from the parameters of a resistive bridge // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 303–305.

Одной из характеристик пиротехнического энергетического воспламенителя является время срабатывания – время, в течение которого от подачи тока на резистивный мостик воспламенителя произойдет вспышка. Время срабатывания зависит от конструктивных особенностей воспламенителя и мощности, подаваемой на резистивный мостик. Конструкция воспламенителя, выполняемого по тонкопленочной технологии, состоит из платы, на которой сформирован резистивный мостик с контактными площадками. В последнее время развивается направление создания воспламенителей, в которых на поверхности резистивного мостика располагается многослойная энергетическая пленка типа Ni/Al, Ti/Al, CuO/Al и т.п., обладающая эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). При точечном тепловом воздействии на поверхность СВС-пленки последняя вспыхивает с выделением большого количества тепла и температуры (до 2000 °С). Этот СВС-эффект позволяет создавать воспламенители с площадью контактирования с пиротехническим составом в десятки раз больше, чем при использовании лишь резистивного мостика.

Цель работы – определение времени срабатывания пиротехнического энергетического воспламенителя в зависимости от конструктивных параметров его изготовления – площади резистивного мостика, величины угла в центре сужения мостика и тока инициирования.

В качестве материала платы воспламенителя использовался ситалл марки СТ50 и керамика марки ВК96. Конструкция платы включала в себя резистивный мостик из многослойной СВС-пленки Ni/Al, толщиной от 5 до 7 мкм. При подаче напряжения, достаточного для подрыва воспламенителя, мостик вспыхивал и инициировал вспышку расположенной на поверхности мостика СВС-пленки толщиной до 10 мкм. Это увеличивало энергию, передаваемую на пиротехнический состав.

Изготавливались энергетические пиротехнические воспламенители с площадью резистивного мостика от 0,8 до 2 мм² и углом в месте сужения мостика от 90° до 160°.

Измерение времени срабатывания воспламенителя от начала подачи напряжения на резистивный мостик определялось по схеме (рис. 1).

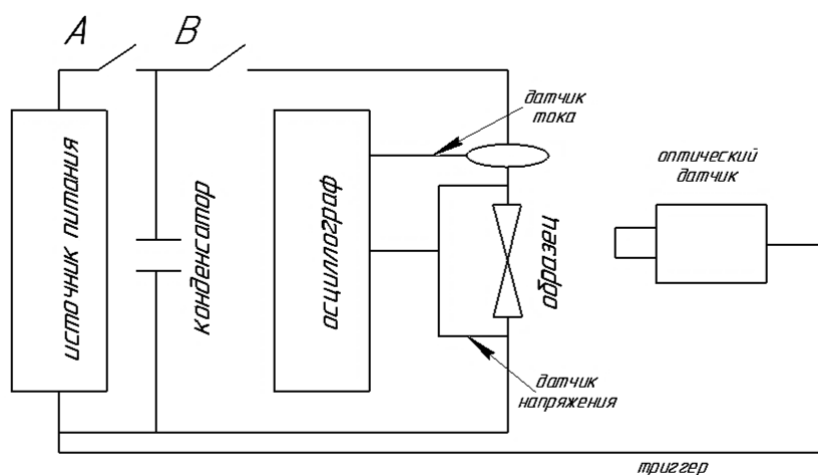


Рис. 1. Схема измерения времени срабатывания воспламенителя

При подаче на резистивный мостик напряжения фиксировалось начало воздействия тока на мостик, начало и окончание вспышки воспламенителя. За время срабатывания воспламенителя принималось время от начала подачи тока до окончания вспышки СВС-пленки. Вспышка воспламенителя происходит после воздействия тока до 10 А. На рис. 2 приведена зависимость времени срабатывания от угла в месте сужения резистивного мостика (ток инициирования - 10 А).

Из рис. 2 следует, что чем больше угол в месте сужения резистивного мостика, тем больше время его срабатывания. Считается, что угол в 90° является оптимальным. В этой области резистивного мостика наибольшая концентрация тока от источника питания, тем самым время срабатывание минимальное. Получено значение времени срабатывания 4-5 мс, что удовлетворяет требованиям к воспламенителям, для которых время срабатывания не должно превышать 10 мс.

Аналогичная зависимость времени срабатывания воспламенителя от площади резистивного мостика приведена на рис. 3. Здесь также наблюдается увеличение времени срабатывания при увеличении площади резистивного мостика, что можно объяснить увеличением отвода тепла от мостика на плату воспламенителя.

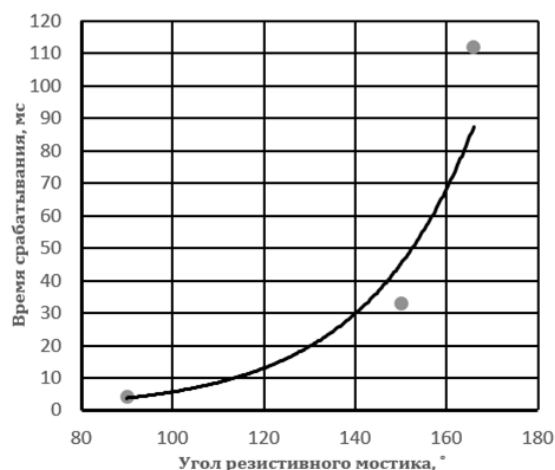


Рис. 2. Зависимость времени срабатывания воспламенителя от угла резистивного мостика

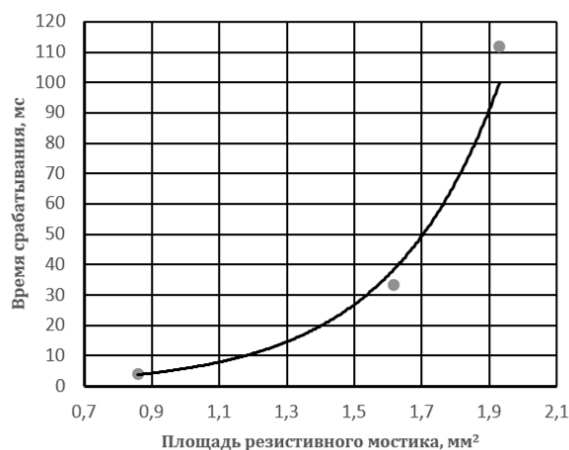


Рис. 3. Зависимость времени срабатывания воспламенителя от площади резистивного мостика

Также определялось время срабатывания воспламенителя от подаваемого на резистивный мостик тока. Воспламенитель вспыхивал при токе не менее 7А. Оптимальным считается ток срабатывания 9-10 А при длительности воздействия не более 10 мс. Построив график зависимости времени срабатывания воспламенителя от подаваемого тока, можно увидеть, что при токе 7 А время срабатывания составляет 11 мс, при токе 12 А – 2 мс. При токе 9-10 А время срабатывания воспламенителя не более 6 мс, что удовлетворяет заданным требованиям.

Заключение

Показано, что время срабатывания пиротехнического энергетического воспламенителя зависит от конструктивных факторов: угла в месте сужения резистивного мостика, площади резистивного мостика. Наименьшее время срабатывания 4-5 мс получено для угла 90° и площади мостика менее 0,9 мм².

Установлено, что время срабатывания зависит от пропускаемого через резистивный мостик тока. При токе 9-10 А время срабатывания составляет не более 6 мс, что удовлетворяет заданным требованиям – время не более 10 мс при токе 10 А.

И. А. Корж, В. В. Вареник, Ю. С. Зонова, Н. А. Чириков

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОСПЛАМЕНИТЕЛЯ ОТ ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Аннотация. Исследована температура поверхности платы пиротехнического энергетического воспламенителя в зависимости от величины безопасного тока, конструкции резистивного мостика и материала подложки. Показано, что при максимально допустимой температуре поверхности платы воспламенителя 120 °С и безопасном токе 2 А сопротивление резистивного мостика не должно превышать 0,08 Ом при применении подложки из оксидной керамики с теплопроводностью 26 Вт/м·К.

Ключевые слова: пиротехнический энергетический воспламенитель, многослойная энергетическая пленка, резистивный мостик, пленки титана, тантала и нитрида тантала.

Для цитирования: Корж И. А., Вареник В. В., Зонова Ю. С., Чириков Н. А. Исследование тепловых характеристик пиротехнического энергетического воспламенителя от его электрических и конструктивных параметров // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 306–309.

I. A. Korzh, V. V. Varenik, Yu. S. Zonova, N. A. Chirikov

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE THERMAL CHARACTERISTICS OF A PYROTECHNIC ENERGY IGNITOR FROM ITS ELECTRICAL AND DESIGN PARAMETERS

Abstract. The surface temperature of the pyrotechnic energy igniter board was studied as a function of the safe current, the design of the resistive bridge, and the substrate material. It was shown that at a maximum allowable surface temperature of 120°C and a resting current of 2 A, the resistance of the resistive bridge should not exceed 0.08 Ohm when using an oxide ceramic substrate with a thermal conductivity of 26 W/m·K.

Keywords: pyrotechnic energy igniter, multilayer energy film, resistive bridge, titanium, tantalum and tantalum nitride films.

For citation: Korzh I. A., Varenik V. V., Zonova Yu. S., Chirikov N. A. Investigation of the thermal characteristics of a pyrotechnic energy ignitor from its electrical and design parameters // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 306–309.

Одна из характеристик пиротехнического энергетического воспламенителя – это величина безопасного тока, при котором в течение некоторого времени воспламенитель не инициируется (не вспыхивает). Обычные значения величины безопасного тока для большинства пиротехнических энергетических воспламенителей находятся в пределах (0,1–0,2) А. Однако для некоторых применений требуются более высокие значения величины безопасного тока – до нескольких ампер. Размер платы, на которой располагается резистивный мостик, обычно невелик – единицы квадратных миллиметров. При пропускании через резистивный мостик большой величины тока, мостик и плата будут нагреваться до значительных температур (сотни градусов), что приведет к деградации воспламенителя.

Цель работы – исследование тепловых характеристик пиротехнического энергетического воспламенителя от величины безопасного тока, теплопроводности платы, конфигурации мостика и материала, из которого он выполнен.

Изготавливались энергетические пиротехнические воспламенители двух типов – с резистивным мостиком на основе пленок Ta-TaN и с резистивным мостиком на основе энергетической СВС-пленки типа Ni/Al.

В качестве материала платы использовался ситалл марки СТ50 и керамика марки ВК96, в качестве материала контактных площадок – пленки меди. Безопасный ток был установлен в размере 2А при длительности воздействия до 5 минут. При этом температура платы не должна была превышать 120-130 °С (при более высокой температуре возможно изменение сопротивления мостика, что не допустимо).

Проводились замеры температуры воспламенителя оптическим пирометром неразрезанных плат на подложке, разрезанных плат и плат в корпусе КТ-1.

Конструкция воспламенителя с резистивным мостиком на основе пленок Ta-TaN предполагает подрыв воспламенителя за счет передачи тепла на поверхность энергетической СВС-пленки типа Ni/Al, располагаемой на поверхности резистивного мостика. Проводился замер изготовленных неразрезанных плат на подложке (сопротивление резистивного мостика – 0,15 Ом). Построив график зависимости температуры поверхности резистивного мостика от величины пропускаемого тока можно увидеть, при токе 2 А температура поверхности резистивного мостика на плате из ВК96 не превышает 35 °С, а на плате из СТ50 не превышает 50 °С. Такие значения температуры объясняются отводом тепла по поверхности подложек и на зонды, установленные на контактные площадки. Температура 120 °С на плате из СТ50 достигается лишь при токе 3,6 А.

Следующим этапом работы было исследование влияния сопротивления выводов корпуса КТ-1 на температуру поверхности платы, смонтированной на основание корпуса. Выводы корпуса КТ-1 выполнены из материала 29НК, имеющего более высокое, чем у меди, удельное объемное сопротивление. Замеры показали, что суммарное сопротивление двух выводов равно 0,1 Ом. Построив график зависимости температуры поверхности основания корпуса КТ-1 от пропускаемого через выводы тока, можно сделать вывод, что при токе в 2 А температура поверхности основания корпуса достигает 70 °С. При этом возникает вопрос, как эта температура при токе 2 А повлияет на температуру поверхности платы, смонтированной на основание корпуса (рис. 1).

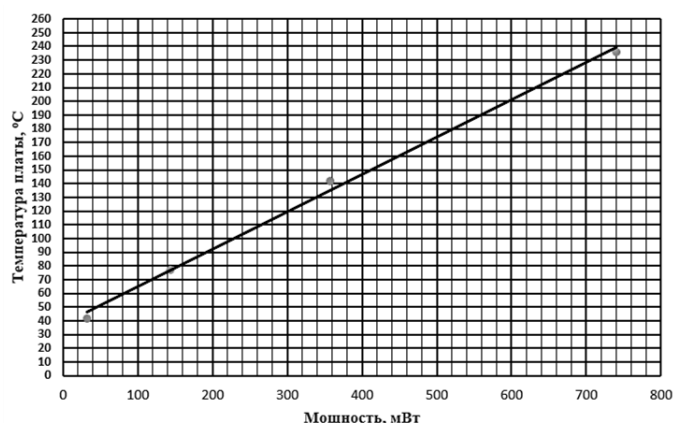


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности платы от прикладываемой мощности

Из рис. 1 следует, что при температуре 120-130 °С прикладываемая мощность Р не

должна превышать 340 мВт. Оценим сопротивление мостика R при токе $I=2$ А по формуле $R=P/I^2=0,34/4=0,085$ Ом. Это в 2 раза ниже сопротивления мостика на плате (0,15 Ом), не смонтированной в корпус КТ-1. Это можно объяснить тем, что нагрев выводов корпуса влияет на температуру платы с резистивным мостиком на основе пленок Ta-TaN.

В конструкции воспламенителя с резистивным мостиком на основе энергетической СВС-пленки типа Ni/Al требуется меньше энергии на подрыв. Однако для СВС-реакции и воспламенения резистивного мостика необходим минимальный теплоотвод в материал платы. Поэтому конструкция предполагает наличие диэлектрической пленки с низкой теплопроводностью между поверхностью резистивного мостика и поверхностью платы. В нашем случае используются пленки фоторезиста с теплопроводностью 0,2 Вт/м·К.

При безопасном токе 2 А температура поверхности платы с таким резистивным мостиком, как и в первой конструкции с мостиком из пленки тантала, не должна превышать 120-130 °С. Отвод образующегося тепла будет происходить в области контактных площадок в объем подложки. Целесообразно при этом использовать в качестве материала платы подложки из материала ВК96 с высокой теплопроводностью (26 Вт/м·К).

Проводились измерения температуры поверхности разрезанной платы (материал ВК96) с подачей тока через зонды. Построив зависимость температуры поверхности платы от мощности, подаваемой на резистивный мостик, можно увидеть, что для температуры платы 120-130 °С мощность равна 0,9-1 Вт. Рассчитаем для этой мощности сопротивление мостика для тока 2А: $R=P/I^2=(0,9-1)/4=(0,22-0,25)$ Ом. Построив зависимость температуры поверхности платы в корпусе КТ-1 от мощности, подаваемой на выводы (рис. 2), можно увидеть, что при температуре платы 120-130 °С прикладываемая мощность не должна превышать 240 мВт. Рассчитаем для этой мощности сопротивление для тока 2А: $R=P/I^2=0,24/4=0,06$ Ом.

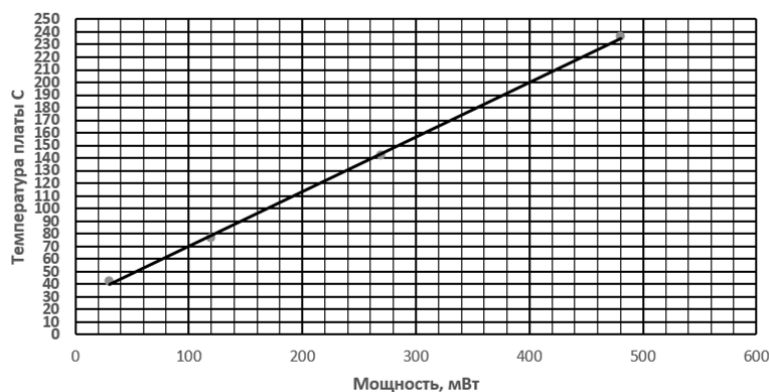


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности платы от прикладываемой мощности

Из этих двух зависимостей можно сделать вывод, что на зондах мощность в 4 раза больше, чем мощность, прикладываемая к плате, смонтированной в корпус. Это можно объяснить лишь отводом тепла на зонды. Так же, как и в случае с мостиком из Ta-TaN, нагрев выводов влияет на температуру поверхности платы. Диэлектрическая пленка из фоторезиста препятствует отводу тепла на подложку. Отвод тепла в этой конструкции возможен лишь через контактные площадки.

Заключение

Сопротивление резистивного мостика на основе пленок Ta-TaN должно быть не более 0,075-0,085 Ом для тока 2 А и температуры 120-130 °С. Сопротивление резистивного мостика на основе энергетической СВС-пленки типа Ni/Al для тока 2 А и температуры 120-130 °С должно быть не более 0,06 Ом.

И. А. Корж¹, А. Ю. Куклев¹⁻³

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

³Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЫСОТЫ ВЫБРОСА ЧАСТИЦ МАТЕРИАЛА ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ РЕЗИСТИВНОГО МОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОСПЛАМЕНИТЕЛЯ

Аннотация. Представлены результаты по определению эффективной высоты выброса частиц материала с поверхности энергетического воспламенителя на основе СВС-пленки Ni/Al. Показано, что при нанесении на поверхность СВС-пленки пиротехнического состава на основе перхлората калия эффективный выброс частиц увеличивается в 10 раз и составляет порядка 10-11 мм.

Ключевые слова: магнетронное распыление, резистивный мостик, СВС-фольга, тонкие пленки, энергетический воспламенитель.

Для цитирования: Корж И. А., Куклев А. Ю. Определение эффективной высоты выброса частиц материала при инициировании резистивного мостика энергетического воспламенителя // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 310–311.

I. A. Korzh¹, A. Yu. Kuklev¹⁻³

¹ Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

² Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

³ Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

DETERMINATION OF THE EFFECTIVE HEIGHT OF PARTICLE EJECTIONS WHEN INITIATING THE RESISTIVE BRIDGE OF THE ENERGY IGNITER

Abstract. The paper presents the results of determining the effective height of particle ejection from the surface of the energy igniter based on a Ni/Al SHS film. It is shown that when a pyrotechnic composition based on potassium perchlorate is applied to the surface of the SHS film, the effective particle ejection increases 10 times and is about 10-11 mm.

Keywords: magnetron sputtering, resistive bridge, SHS foil, thin films, energy igniter.

For citation: Korzh I. A., Kuklev A. Yu. Determination of the effective height of particle ejections when initiating the resistive bridge of the energy igniter // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 310–311.

В настоящее время для различных применений, в частности при проведении работ по добыче полезных ископаемых используются энергетические воспламенители, представляющие собой плату, смонтированную в корпусе с двумя выводами. На плате размещается пленочный резистивный мостик с контактными площадками, соединёнными с выводами на основании корпуса. На поверхности резистивного мостика располагается энергетическая пленка из тонких 30-50 нм повторяющихся пар слоев типа Al/Ni, Al/Ti, Al/CuO и т.п., обладающих эффектом самораспространяющегося высокотемпературного

синтеза (СВС). Получение таких многослойных структур осуществляется методом вакуумного магнетронного распыления мишеней из соответствующих металлов в инертной атмосфере аргона, или в реактивной атмосфере (Ar/O_2) при получении слоев бинарных соединений.

При подаче на резистивный мостик напряжения от источника тока или от пускового конденсатора, происходит подрыв мостика и инициирование пиротехнического состава, контактирующего с поверхностью СВС пленки. Однако, при определенных технических задачах в ряде конструкций энергетических воспламенителей предусматривается зазор между поверхностью СВС пленки и поверхностью размещенного пиротехнического состава.

При подрыве резистивного мостика с СВС пленкой образуется выброс частиц материала прореагировавшего мостика, которые достигают поверхности пиротехнического состава и приводят его к воспламенению. Эффективная высота выброса частиц, при которой происходит воспламенение пиротехнического состава, является одним из основных параметров энергетического воспламенителя. Так, например, в патенте CN112254586. Полупроводниковый мост из композитной энергетической пленки. 2021-01-22 (Китай) приведена конструкция энергетического воспламенителя с зазором не менее 2 мм между поверхностью резистивного моста и поверхностью пиротехнического заряда. Обычно достаточно чтобы этот зазор составлял 0,1-0,2 мм. В работе Journal of applied physics, 113, 184505(2013), Characterization of Al/CuO nanoenergetic multilayer films integrated with semiconductor bridge for initiator applications, высоту выброса пламени от вспыхнувшего резистивного мостика определяли при помощи высокоскоростной съемки.

Однако это не означает, что при высоте выброса пламени, определенной при помощи высокоскоростной съемки, произойдет подрыв пиротехнического состава. Необходим способ, при котором выброс частиц приведет к гарантированному воспламенению пиротехнического состава. В качестве решения данной задачи, предлагается наносить на поверхность СВС пленки пиротехнический состав на основе перхлората калия (KClO_4), что обеспечит выброс высокотемпературных частиц самого состава, тем самым обеспечив воспламенение основного пиротехнического заряда.

Цель работы определение эффективной высоты выброса частиц материала перхлората калия нанесенного на поверхность резистивного мостика энергетического воспламенителя с СВС фольгой.

Эффективность зажигания пиротехнического заряда определяли при помощи свободностоящей реакционной СВС фольги Al/Ni, толщиной 20-30 мкм, располагаемой на определенном расстоянии от поверхности резистивного мостика. В данном случае свободностоящая СВС фольга выступает в качестве реакционного материала, при помощи которого можно определить эффективную высоту выброса частиц. При подаче на резистивный мостик напряжения (в нашем случае 3-4 В) происходила СВС реакция фольги Ni/Al с последующим выбросом частиц перхлората калия, предварительно нанесенного на поверхность СВС фольги. Эти частицы достигали поверхности СВС фольги, установленной на расстоянии h . Возгорание реакционной фольги в данном случае, служит мерой определения эффективного выброса частиц перхлората калия с поверхности воспламенителя. Максимальное расстояние определялось путем увеличения количества калибровочных мер, толщиной 0,5 мм.

В результате проведенных исследований можно заключить, что эффективный выброс частиц воспламенителя на основе СВС фольги без нанесенного пиротехнического состава составляет 0,5-1 мм. При нанесении пиротехнического состава на основе перхлората калия на поверхность СВС пленки гарантированная эффективность срабатывания реакционной фольги увеличивается и составляет 10-11 мм.

И. А. Корж¹, Д. Н. Маркова²

¹Омский научно-исследовательский институт приборостроения

Омск, Российская Федерация

²Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОКИСНЫХ ПЛЕНОК ТАНТАЛА, МЕДИ И НИКЕЛЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОСПЛАМЕНТЕЛЕЙ

Аннотация. Приведены результаты экспериментов по определению теплопроводности окисных пленок тантала Ta_2O_5 , окисных пленок меди и никеля, используемых для термической и диэлектрической изоляции резистивного мостика при изготовлении энергетического воспламенителя на основе пленок Al/Ni, CuO/Al, NiO/Al с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Получены значения теплопроводности пленок оксида тантала Ta_2O_5 0,92 Вт/м²·°С, что совпадает с известными данными 0,95±0,1 Вт/м²·°С. Теплопроводность пленок оксида меди CuO составила 0,24 Вт/м²·°С, что значительно ниже известных значений (1-4 Вт/м²·°С). Теплопроводность пленок оксида никеля NiO составила 0,18 Вт/м²·°С.

Ключевые слова: окисная пленка тантала, окисные пленки меди и никеля, теплопроводность пленок.

Для цитирования: Корж И. А., Маркова Д. Н. Исследование теплопроводности окисных пленок тантала, меди и никеля, используемых для изготовления энергетических воспламенителей // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7-8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 312–314.

I. A. Korzh¹, D. N. Markova²

¹Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

²Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

INVESTIGATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF TANTALUM, COPPER, AND NICKEL OXIDE FILMS USED FOR THE MANUFACTURE OF ENERGY IGNITERS

Abstract. The paper presents the results of experiments on determining the thermal conductivity of Ta_2O_5 tantalum oxide films, copper and nickel oxide films used for thermal and dielectric insulation of a resistive bridge in the manufacture of energy igniters based on Al/Ni, CuO/Al, NiO/Al films with the effect of self-propagating high-temperature synthesis. The thermal conductivity values of Ta_2O_5 tantalum oxide films are 0,92 W/m²·°C, which coincides with the known data of 0,95±0,1 W/m²·°C. The thermal conductivity of CuO copper oxide films was 0,24 W/m²·°C, which is significantly lower than the known values (1-4 W/m²·°C). The thermal conductivity of NiO nickel oxide films was 0,18 W/m²·°C.

Keywords: tantalum oxide film, copper and nickel oxide films, thermal conductivity of films.

For citation: Korzh I. A., Markova D. N. Investigation of the thermal conductivity of tantalum, copper and nickel oxide films used for the manufacture of energy igniters // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 312–314.

Типичная конструкция энергетического воспламенителя состоит из платы, на которой сформирован резистивный мостик с контактными площадками для подачи импульса тока от пускового конденсатора. На поверхности резистивного мостика располагается энергетическая пленка, обладающая эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), увеличивающая эффективность срабатывания воспламенителя за счет выделения большого количества тепла с высокой температурой (в ряде случаев свыше 4000 °С). Между поверхностью резистивного мостика и поверхностью платы располагается термоизолирующая пленка, а между поверхностью резистивного мостика и поверхностью СВС пленки располагается изолирующая пленка.

Для того чтобы уменьшить потери тепла в подложку от вспыхнувшего резистивного мостика используют термоизолирующие пленки с низкой теплопроводностью. Также пленки с низкой теплопроводностью используются в качестве диэлектрических изоляционных пленок между поверхностью резистивного мостика и поверхностью СВС пленки типа Al/Ni. Тем самым при конденсаторном подрыве резистивного мостика происходит максимальная концентрация температуры в объеме мостика, что позволяет с высокой надежностью инициировать СВС реакцию.

Нами при изготовлении пиротехнического воспламенителя используются подложки из ситалла с теплопроводностью 1,4 Вт/м·К, резистивные мостики из пленок тантала Ta и нитрида тантала TaN и комбинированные СВС пленки из Al/Ni, Al/CuO и Al/NiO. Для термической изоляции танталового резистивного мостика целесообразно рассмотреть использование окисных пленок тантала и окисных пленок меди и никеля, так как эти пленки используются в технологическом процессе изготовления пиротехнического энергетического воспламенителя.

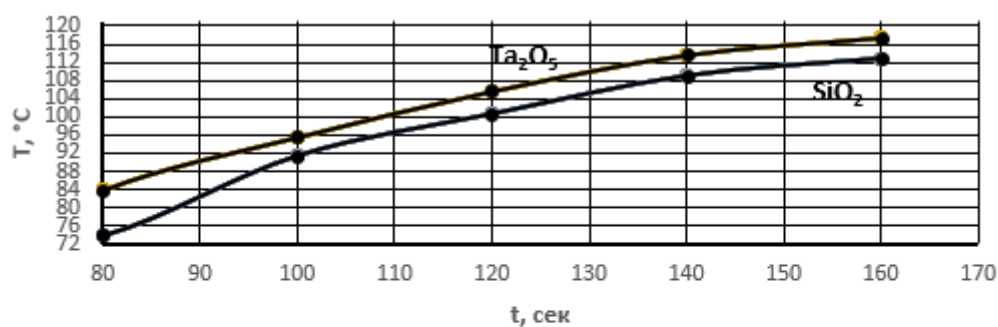
Цель работы – исследование теплопроводности тонких окисных пленок тантала и окисных пленок меди и никеля, используемых для термической изоляции резистивного мостика и диэлектрической изоляции многослойных энергетических пленок Al/Ni, Al/CuO, Al/NiO от поверхности мостика в конструкции энергетических воспламенителей.

Нами для определения теплопроводности пленок $\lambda_{пл}$ использована методика, основанная на сравнении величины теплового потока, проходящего через исследуемую пленку с величиной теплового потока, проходящего через эталонную пленку с известной теплопроводностью $\lambda_{эт}$. Искомую величину теплопроводности определяют по формуле $\lambda_{пл} = \lambda_{эт} \cdot (t_1 - t_0) \cdot h_{пл} / (t_2 - t_0) \cdot h_{эт}$. Здесь t_1 – температура эталонной пленки, нанесенной на исследуемую пленку; t_2 – температура эталонной пленки, нанесенной на подложку; t_0 – начальная температура пленок и подложки; $h_{пл}$ – толщина исследуемой пленки; $h_{эт}$ – толщина эталонной пленки.

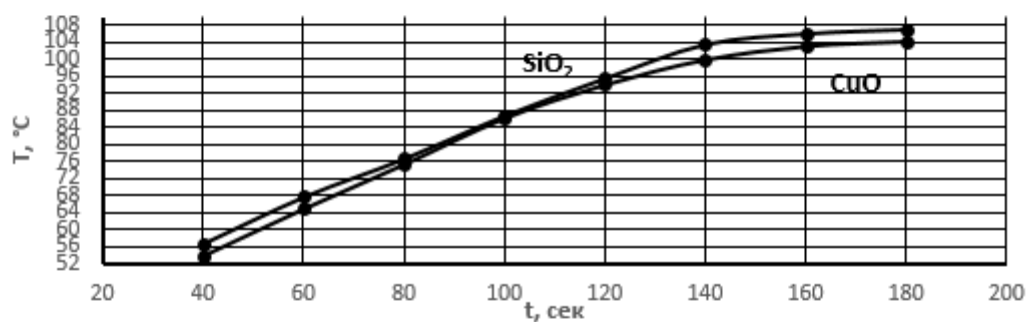
В качестве эталонной пленки, наносимой на поверхность подложки и поверхность исследуемых пленок, использовались пленки окиси кремния SiO₂, толщиной 1 мкм с теплопроводностью 1,4 Вт/м·°С.

На рисунке приведены зависимости температуры на поверхности пленки оксида тантала (0,7 мкм) (рис. а), пленки оксида меди (0,17 мкм) (рис. б), пленки оксида никеля (0,13 мкм) и поверхности ситалловой подложки с пленкой окиси кремния от времени нагрева.

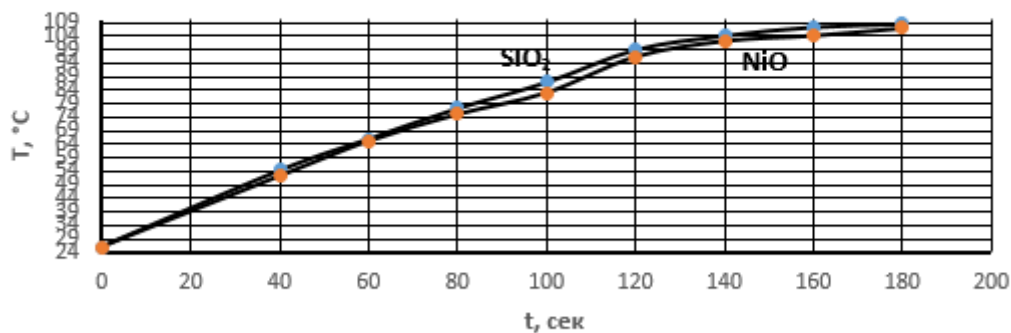
Рассчитанная теплопроводность пленки Ta₂O₅ равна 0,92 Вт/м·°С, что практически совпадает со известным значением 0,95±0,1 Вт/м·°С, теплопроводность пленки CuO 0,24 Вт/м·°С, что значительно ниже известных значений (1-4 Вт/м·°С), теплопроводность пленки NiO 0,18 Вт/м·°С.



a)



б)



в)

*Изменение температуры поверхности пленок
Ta₂O₅ (а), CuO (б), NiO (в) и SiO₂ от времени нагрева*

Заключение

Исследованы теплопроводности пленок Ta₂O₅, CuO и NiO, которые применяются при изготовлении энергетических воспламенителей с резистивными пленками из тантала и нитрида тантала и СВС пленками Al/Ni, Al/CuO и Al/NiO. Теплопроводность пленок Ta₂O₅ составила 0,92 Вт/м·°C, CuO 0,24 Вт/м·°C, NiO 0,18 Вт/м·°C

А. Ю. Куклев^{1,3}, Л. В. Баранова^{1,3}, В. И. Струнин^{1,3}, Н. А. Чириков^{1,2}

¹Омский научный центр СО РАН (Институт радиопластики и физической электроники)
Омск, Российская Федерация

²Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

³Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ ТИПА МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ

Аннотация. Представлены результаты исследования показателя преломления тонких пленок нитрида кремния, полученных методом вакуумного магнетронного распыления в магнетронном разряде постоянного тока и высокочастотном магнетронном разряде. Показано, что показатель преломления полученных пленок находится в одном интервале величин при использовании разных типов магнетронного разряда и составляет -1,96 для образца, полученного на постоянном токе и -2,06 для образца, полученного на высокочастотном разряде.

Ключевые слова: брэгговский отражатель, магнетронное распыление, нитрид кремния, тонкие пленки, тонкопленочный резонатор.

Для цитирования: Куклев А. Ю., Баранова Л. В., Струнин В. И., Чириков Н. А. Влияние типа магнетронного разряда на оптические характеристики тонких пленок нитрида кремния // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 315–316.

A. Yu. Kuklev^{1,3}, L. V. Baranova^{1,3}, V. I. Strunin^{1,3}, N. A. Chirikov^{1,2}

¹Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

²Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

³Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

INFLUENCE OF MAGNETRON DISCHARGE TYPE ON OPTICAL CHARACTERISTICS OF SILICON NITRIDE THIN FILMS

Abstract. The paper presents the results of a study of the refractive index of thin silicon nitride films obtained by vacuum magnetron sputtering in a direct current magnetron discharge and a high-frequency magnetron discharge. It is shown that the refractive index of the films obtained is in the same range of values when using different types of magnetron discharge and is -1,96 for a sample obtained with direct current and -2,06 for a sample obtained with a high-frequency discharge.

Keywords: Bragg reflector, magnetron sputtering, silicon nitride, thin films, thin-film resonator.

For citation: Kuklev A. Yu., Baranova L. V., Strunin V. I., Chirikov N. A. Influence of magnetron discharge type on optical characteristics of silicon nitride thin films // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 315–316.

В настоящее время актуальной научно-технической задачей является создание тонкопленочных микроэлектронных устройств генерации и селекции частот в сверхвысокочастотном диапазоне (СВЧ). Такими устройствами являются резонаторы на объемных акустических волнах (ОАВ), а также СВЧ фильтры, построенные на основе нескольких ОАВ-резонаторов. Наиболее механически прочной для изготовления конструкцией является резонатор с пьезоэлектрическим преобразователем на основе AlN и акустическим брэгговским отражателем на основе чередующихся пар слоев с различным акустическим импедансом. Одним из перспективных материалов для использования в конструкции отражателя является нитрид кремния (Si_3N_4), который является диэлектрическим материалом с шириной запрещенной зоны порядка 4-5 эВ. При этом обладает низкой шероховатостью поверхности 4-6 нм и скоростью продольной акустической волны – 11000 м/с, что делает его приемлемым для использования в качестве низкоимпедансного слоя в структуре брэгговского отражателя.

Целью данной работы является проверка влияния разных типов разряда используемых для получения пленок нитрида кремния, полученных методом вакуумного магнетронного распыления, на их оптические характеристики, в частности на значение показателя преломления для их использования в качестве слоя брэгговского отражателя.

Образцы нитрида кремния были получены на вакуумной установке осаждения многокомпонентных покрытий. Мишень чистого кремния (99,95%) устанавливалась на водоохлаждаемый катод с использованием теплопроводящего состава. Вакуумная камера предварительно откачивалась до давления $1 \cdot 10^{-4}$ Па. Кремниевые пластины 20x16 мм, предварительно очищались ионной бомбардировкой атомами аргона при давлении 0,1 Па. Рабочее давление в процессе осаждения пленок составляло 0,07 Па.

В одном случае магнетронный разряд запускался от источника питания постоянного тока (DC), в другом случае использовался высокочастотный источник питания (RF). Таким образом были получены образцы нитрида кремния с идентичными технологическими режимами, но в магнетронном разряде от различных источников питания. Исследование показателя преломления полученных пленок осуществлялось на микроинтерферометре Линника МИИ-4 и определялось как отношение разности интерференционных полос, отраженных от поверхности Si_3N_4 и от границы раздела Si_3N_4 /кремниевая подложка.

В случае образцов, полученных на DC разряде, показатель преломления составил -1,96 на толщине пленки 0,66 мкм, а для образцов, полученных на RF разряде, -2,06 на толщине пленки 0,68 мкм. Результаты говорят о получении при обоих видах разряда для пленок, сравнимых по толщине значений показателя преломления, с учетом погрешности измерения, сопоставимых по значению с известными для Si_3N_4 значениями показателя преломления -2,02. Хотя отклонение от этого значения в случае DC разряда оказалось чуть больше.

Таким образом, можно сделать вывод, что при равных толщинах пленок Si_3N_4 тип разряда не влияет на оптические свойства пленок, такие как показатель преломления.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-12-20010).

А. Ю. Куклев^{1,3}, Л. В. Баранова^{1,3}, В. И. Струнин^{1,3}, Н. А. Чириков^{1,2}

¹Институт радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН
Омск, Российская Федерация

²Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

³Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Аннотация. Представлены результаты исследования внутренних механических напряжений и показателя преломления тонких пленок AlN, полученных методом магнетронного напыления при рабочем давлении в вакуумной камере 0,1 и 0,2 Па. Показано, что показатель преломления полученных пленок незначительно изменяется от 2,02 до 2,05 при увеличении мощности магнетронного разряда от 0,4 кВт до 1 кВт и фиксированном давлении 0,1 Па, а в случае давления 0,2 Па изменится от 2,01 до 2,12. Полученные значения механических напряжений в аналогичном интервале мощности разряда говорят об уменьшении внутренних напряжений при увеличении рабочего давления с 0,1 до 0,2 Па, и находятся в диапазоне от 2,65 до 3,1 ГПа и от -0,27 до 1,84 ГПа соответственно.

Ключевые слова: внутренние напряжения, магнетронное распыление, нитрид алюминия, пьезоэлектрический резонатор, тонкие пленки.

Для цитирования: Куклев А. Ю., Баранова Л. В., Струнин В. И., Чириков Н. А. Исследование внутренних механических напряжений и показателя преломления в тонких пленках нитрида алюминия, полученных методом магнетронного напыления // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 317–319.

A. Yu. Kuklev^{1,3}, L. V. Baranova^{1,3}, V. I. Strunin^{1,3}, N. A. Chirikov^{1,2}

¹Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

²Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

³Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

STUDY OF INTERNAL MECHANICAL STRESSES AND REFRACTIVE INDEX IN THIN FILMS OF ALUMINUM NITRIDE, OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING

Abstract. The paper presents the results of studying the internal mechanical stresses and the refractive index of AlN thin films obtained by magnetron sputtering at an operating pressure in a vacuum chamber of 0,1 and 0,2 Pa. It is shown that the refractive index of the obtained films changes slightly from 2,02 to 2,05 with an increase in the magnetron discharge power from 0,4 to 1 kW at a fixed pressure of 0,1 Pa, and in the case of a pressure of 0,2 Pa it changes from 2,01 to 2,12. The obtained values of mechanical stresses in a similar range of discharge power indicate a decrease in internal stresses with an increase in the operating pressure from 0,1 to 0,2 Pa, and are in the range from 2,65 to 3,1 GPa and from -0,27 to 1,84 GPa, respectively.

Keywords: internal stresses, magnetron sputtering, aluminum nitride, piezoelectric resonator, thin films.

For citation: Kuklev A. Yu., Baranova L. V., Strunin V. I., Chirikov N. A. Study of internal mechanical

stresses and refractive index in thin films of aluminum nitride, obtained by magnetron sputtering // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 317–319.

В настоящее время нитрид алюминия (AlN) является перспективным материалом для создания на его основе устройств микроакустоэлектроники. В частности, актуальной научно-технической задачей является создание высокодобротных пьезоэлектрических резонаторов на объемных акустических волнах (ОАВ). Такие устройства должны обеспечивать стабильную работу в диапазоне сверхвысоких частот от 1 до 20 ГГц. Наибольшее распространение среди используемых конструкций СВЧ резонаторов на ОАВ получили: многочастотный составной резонатор, резонатор мембранного типа, резонатор с воздушным зазором и резонатор с акустическим брэгговским отражателем. Получение таких многослойных тонкопленочных структур осуществляется методом магнетронного осаждения.

Основными параметрами, определяющими работу пьезоэлектрического резонатора, являются его добротность, резонансный промежуток и рабочая частота. Частота определяется толщиной пьезоэлектрической пленки, а на добротность влияют многие параметры, среди которых: пьезоэлектрический отклик, фазовый и стехиометрический состав поликристаллической пленки, оптические свойства, а также внутренние механические напряжения. На эти параметры как правило влияют технологические режимы магнетронного осаждения, такие как: состав газовой смеси, рабочее давления, мощность разряда, температура подложки и др.

Целью данной работы является исследование влияния рабочего давления в вакуумной камере в процессе осаждения пленок AlN на их внутренние механические напряжения и показатель преломления.

Синтез пленок AlN осуществлялся методом вакуумного магнетронного распыления мишени чистого Al (99,999%) в реактивной газовой смеси аргона и азота на установке для нанесения многокомпонентных покрытий. На ситалловых и кремниевых подложках размерами 20x16 мм были получены серии образцов AlN в диапазоне мощностей от 0,4 до 1 кВт при давлении в вакуумной камере 0,1 и 0,2 Па. Контроль толщины полученных пленок осуществлялся непосредственно в процессе осаждения резонансным методом, путем предварительной калибровки встроенного в толщиномер кварцевого резонатора.

Исследование показателя преломления и внутренних механических напряжений осуществлялось интерференционным методом на микроинтерферометре Линника МИИ-4.

В случае исследования механических напряжений измерялся радиус кривизны ситалловой подложки до и после осаждения пленки AlN. Показатель преломления определялся как отношение разности интерференционных полос, отраженных от поверхности AlN и от границы раздела AlN/Si.

Показатель преломления полученных пленок находится в пределах от 2,02 до 2,05 для серии образцов при фиксированном давлении – 0,1 Па, незначительно меняясь в диапазоне мощностей от 0,4 до 1 кВт. Значения показателя преломления для аналогичной серии при фиксированном давлении – 0,2 Па меняются с ростом мощности более существенно от 2,01 до 2,12, тем не менее они также согласуются с литературными значениями для поликристаллических пленок AlN, находящимся в диапазоне 1,9–2,2.

Вычисленные по формуле Стоуни значения внутренних механических напряжений при изменении мощности разряда от 0,4 до 1 кВт лежат в диапазоне от 2,65 до 3,1 ГПа

для серии пленок, полученных при давлении 0,1 Па, что говорит о наличии растягивающих внутренних напряжений. Для серии пленок, полученных при 0,2 Па, эти значения лежат в диапазоне от -0,27 до 1,84 ГПа.

Полученные результаты позволяют заключить, что при магнетронном нанесении пленок нитрида алюминия повышение давления в камере приводит к увеличению показателя преломления пленок и к снижению механических напряжений в пленках.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-12-20010).

Е. И. Маркова, М. А. Яворская

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
Москва, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ РАСШИРЕНИЯ ПОЛИУРЕТАНА В ПРОЦЕССЕ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

Аннотация. Определены степени расширения полиуретана в процессе полимеризации. Исследуются три вида полиуретана: ППУ-305, ОПЭК-75, Noacast-700 – с целью количественной оценки их объемного расширения при переходе из жидкого состояния в твердое для последующего применения инженерами в своих работах.

Ключевые слова: полимеризация, полиуретан, объем, усеченный конус, ППУ-305, ОПЭК-75, Noacast-700.

Для цитирования: Маркова Е. И., Яворская М. А. Определение степени расширения полиуретана в процессе полимеризации // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 320–322.

E. I. Markova, M. A. Yavorskaya

National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russian Federation

DETERMINATION OF THE DEGREE OF EXPANSION OF POLYURETHANE DURING POLYMERIZATION

Abstract. This paper examines the degree of expansion of polyurethane during polymerization. It studies three types of polyurethane: PU-305, OPEK-75, and Noacast-700 in order to quantify their volumetric expansion during the transition from a liquid state to a solid state for subsequent use by engineers in their work.

Keywords: polymerization, polyurethane, volume, truncated cone, PPU-305, OPEK-75, Noacast-700.

For citation: Markova E. I., Yavorskaya M. A. Determination of the degree of expansion of polyurethane during polymerization // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 320–322.

Развитие современного сельского хозяйства связано с внедрением радиоэлектронной аппаратуры, например, система мониторинга состояния крупного рогатого скота на основе носимых датчиков. В состав данной системы входит болюс – это миниатюрная капсула (рис. 1), помещаемая в желудок коровы, которая позволяет непрерывно отслеживать состояние животного. Ключевыми компонентами болюса являются приемопередатчик и патч-антенна. Данное оборудование позволяет выявить заболевания, определять половую охоту у коров и оценивать их продуктивность.

Поскольку данное устройство функционирует в агрессивной среде желудочно-кишечного тракта, критически важным является обеспечение его надежной герметизации и механической защиты. Одним из распространенных материалов для такого применения является полиуретан, обладающий высокой стойкостью к износу и механическим нагрузкам. Однако ключевой проблемой применения полиуретана в качестве герметизирующего диэлектрика для радиоэлектронной аппаратуры является его объемное расширение при затвердевании. Возникающие при этом внутренние механические напряжения сжатия приводят к деформации печатной платы и искажению геометрии излучающих элементов патч-антенны, что приводит к отклонению её рабочего диапазона частот.

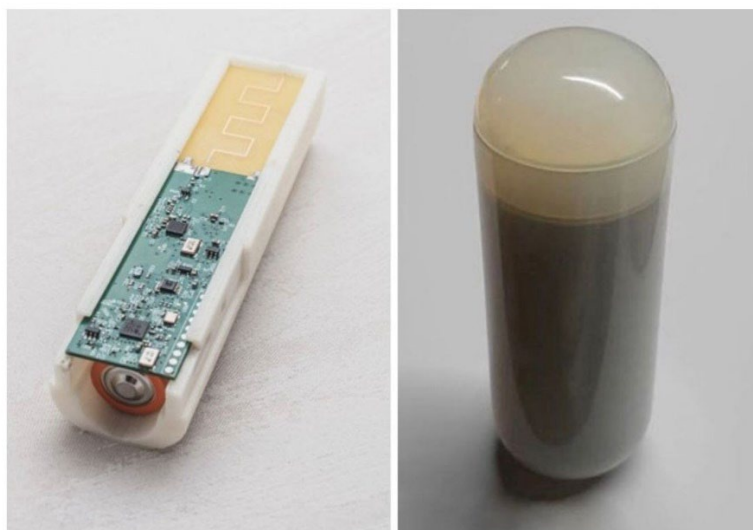


Рис. 1. Изображение болюса

В работе исследуется три вида полиуретана: ППУ-305, ОПЭК-75, Noacast-700, с целью количественной оценки их объемного расширения при переходе из жидкого состояния в твердое для последующего применения инженерами в своих работах.

Необходимо рассчитать для каждого из 3-х видов полиуретана расширяющий объем после полимеризации. Для эксперимента используются следующие материалы: полиуретан трех видов, мерный стакан из пластика объемом 200 мл, одноразовые деревянные палочки, перчатки резиновые, штангенциркуль.

На основании пропорций, представленных производителем в документации на исследуемые полиуретаны, смешаны три композиции. Следующим шагом проводится измерение объема жидкого полиуретана, значение фиксируется в таблицу (рис. 2). После затвердевания полиуретана измеряется конечный объем, который также фиксируется (рис. 2). На основании измеренных данных вычисляется число N , которое отображает, во сколько раз увеличился размер полиуретана после полимеризации.

Наименование полиуретана	Показания до затвердевания				Показания после затвердевания				Коэффициент расширения
	h_1 , см	$r_{в1}$, см	$r_{н1}$, см	V_1 , см ³	h_2 , см	$r_{в2}$, см	$r_{н2}$, см	V_2 , см ³	N , раз
ОПЭК-75	0,5	2,25	2,15	7,55	2,33	2,32	2,15	36,4	4,8
ППУ-305	0,6	2,25	2,15	9,3	2,37	2,32	2,15	37,1	1
Noacast-700	0,6	2,21	2,17	8,90	0,6	2,21	2,17	8,90	4

Рис. 2. Результаты измерений и вычислений

Для удобства расчета объема принято решение приравнять пластиковый мерный стакан к геометрической фигуре. Мерный стакан схож с усеченным (срезанным) конусом. Для расчета используется формула, которая вычисляет объем усеченного конуса, где V – объем усеченного конуса, $\pi = 3,14$, h – высота конуса, r_v – радиус большего диа-

метра, r_n — радиус меньшего диаметра. Данные каждого вида определены самостоятельным измерением. Берутся показания до затвердевания 3-х видов полиуретана с индексом 1 и после затвердевания с индексом 2. Ссылаясь на формулу усеченного конуса, для ОПЭК-75 получаем $V_1 = 7,55 \text{ см}^3$ и $V_2 = 36,4 \text{ см}^3$. Также рассчитывается число N , которое показывает, во сколько раз увеличился объем полиуретана ОПЭК после затвердевания ($N = 4,8$ раз).

Аналогично для ППУ-305 рассчитывается объем и число N . Для ППУ-305 $V_1 = 9,1 \text{ см}^3$, $V_2 = 37,1 \text{ см}^3$ и $N = 4,07$ раз. Для Noacast-700 определяется объем и число N . Для Noacast-700 $V_1 = 8,9 \text{ см}^3$, $V_2 = 8,9 \text{ см}^3$, соответственно $N = 1$ раз.

В результате измерений определен расширяющий объем после полимеризации для трех видов полиуретана. Таким образом, наибольшее расширение показал ОПЭК-75 (увеличение в 5 раз), затем ППУ-305 (в 4 раза). Noacast-700 остался без изменения после затвердевания. Результаты работы предоставляют инженерам конкретные данные для учета деформационных свойств полиуретанов при разработке ответственных узлов радиоэлектронной аппаратуры.

К. В. Немчанов, Ч. М. Баймурзин, Д. А. Попков, И. А. Батырев
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТЕНДОВ ПРОВЕРКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСХЕМ

Аннотация. Разработка автоматизированных стендов проверки электрических параметров позволяет в рамках импортозамещения проводить эффективный мониторинг параметров крупных партий изготавливаемых изделий микроэлектроники, сокращая время проведения испытаний, тем самым ускоряя выпуск высококачественной продукции.

Ключевые слова: микросхема, микроэлектроника, стенды, автоматизация, измерения.

Для цитирования: Немчанов К. В., Баймурзин Ч. М., Попков Д. А., Батырев И. А. Разработка автоматизированных стендов проверки электрических параметров микросхем // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 323–325.

K. V. Nemchanov, Ch. M. Baimurzin, D. A. Popkov, I. A. Batyrev
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

DEVELOPMENT OF AUTOMATED TEST BENCHES FOR INTEGRATED CIRCUIT ELECTRICAL PARAMETERS

Abstract. The development of automated test benches for electrical parameters enables effective monitoring of parameters in large batches of manufactured microelectronics products within the import substitution framework. This reduces testing time, thereby accelerating the release of high-quality products.

Keywords: integrated circuit, microelectronics, test benches, automation, measurements.

For citation: Nemchanov K. V., Baimurzin Ch. M., Popkov D. A., Batyrev I. A. Development of automated test benches for integrated circuit electrical parameters // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 323–325.

Актуальность разработки автоматизированных стендов проверки электрических параметров микросхем обусловлена необходимостью импортозамещения в микроэлектронной отрасли в связи с уходом с рынка ключевых западных поставщиков. Поскольку мгновенная технологическая независимость сложно достижима, развитие отечественного производства микросхем становится критически важным аспектом для обеспечения технологического суверенитета. Особую значимость работам придают ужесточённые требования к локализации, установленные в Приказе Минпромторга России от 30 августа 2021 г. № 4781 и закреплённые в Постановлении Правительства РФ от 30 марта 2022 г. № 353: для получения статуса отечественной продукции до 90% электронных компонентов должны производиться в РФ. Таким образом, создание автоматизированных стендов является важнейшей задачей, так как позволяет повысить скорость, точность тестирования и качество выпускаемых микросхем, что непосредственно влияет на темпы развития отрасли и конкурентоспособность продукции.

Для тестирования микросхемы ослабителя джиттера 5120AX015 был разработан

автоматизированный стенд проверки. Ближайший зарубежный аналог – микросхема HMC7044 (Analog Devices, США). Разрабатываемое изделие предназначено для аппаратуры сетей сотовой связи, генерации опорных сигналов тактирования преобразователей данных с интерфейсом JESD204B и работы в системах с активной фазированной антенной решёткой.

Структура микросхемы включает: два последовательно соединенных синтезатора с фазовой автоподстройкой частоты; блок приемников опорной частоты (мультиплексирование до 4 источников, деление частоты 1-255); блок формирования опорной частоты; блок вывода опорной частоты.

Первый синтезатор работает с внешним источником тактового сигнала, второй – с внутренним генератором управляемый напряжением. Блок формирования частоты обеспечивает до 14 независимых каналов с программируемым делением (1-4094) и регулируемой задержкой. Блок вывода поддерживает интерфейсы LVPECL, CML, LVDS или CMOS для согласования с нагрузкой. Дополнительно микросхема содержит: контроллер SPI для управления через регистры; блок управления питанием; блок синхронизации для совместной работы нескольких кристаллов.

Для проверки параметров данной микросхемы был разработан автоматизированный стенд проверки электрических параметров. Концепция автоматизированного стенда представляет собой многоуровневую систему управления:

- аппаратный уровень: включает исследуемую микросхему и специализированную плату (стенд проверки параметров) с контактной колодкой для установки компонента (рис. 1а);

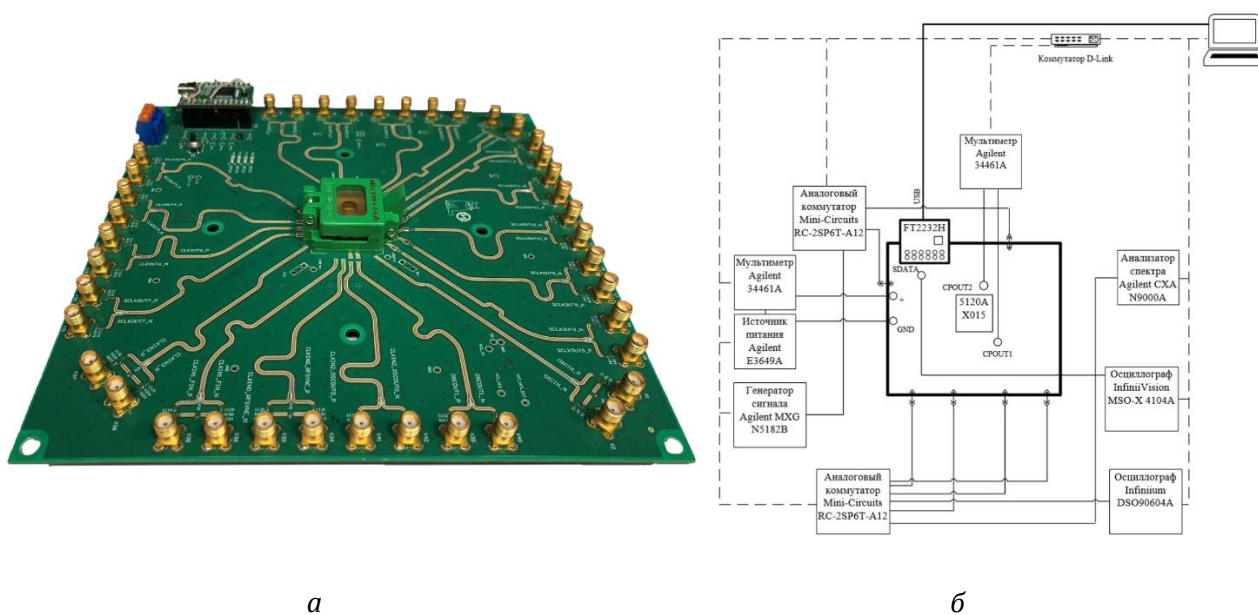


Рис. 1: а) внешний вид стенда проверки электрических параметров;
б) схема подключения измерительного оборудования к стенду проверки параметров

- программный уровень управления микросхемой: состоит из микроконтроллера на плате, выполняющего преобразование USB-UART, и программного обеспечения для работы с последовательным интерфейсом. Данный уровень обеспечивает чтение и запись значений в управляющие регистры микросхемы;
- уровень графического интерфейса: предусматривает разработку пользователь-

ского приложения для визуализации управления регистрами и настройками микросхемы. На этом этапе становятся возможны ручные измерения и получение первичных результатов (рис. 2);

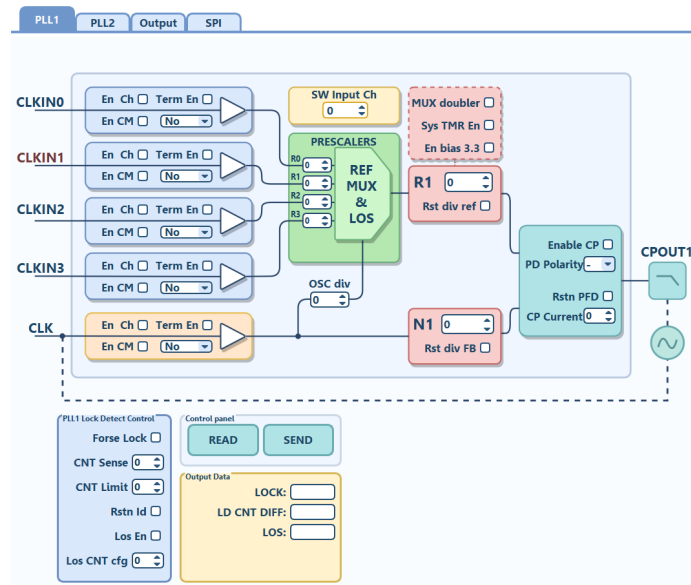


Рис. 2. Основная вкладка графического интерфейса «JitterGuard»

- уровень интеграции измерительного оборудования: предполагает создание системы подключения и управления измерительными приборами, а также разработку программного обеспечения для синхронного управления как микросхемой, так и измерительным оборудованием (рис. 1б).

Для функционирования автоматизированного стенда было разработано специализированное программное обеспечение JitterGuard. Программный продукт JitterGuard предназначен для конфигурации радиационно-стойкой микросхемы ослабителя джиттера 5120AX015. Обеспечивает взаимодействие персонального компьютера с микросхемой посредством передачи данных через аппаратный USB-мост FTDI по последовательному интерфейсу SPI. Функциональные возможности продукта включают: организацию обмена данными между компьютером и микросхемой по протоколу SPI; запись значений в управляющие регистры микросхемы; мониторинг текущей конфигурации микросхемы; контроль проводимых измерений. Программное обеспечение позволяет пользователю конфигурировать микросхему для работы в технологической системе обеспечивая возможность тестирования крупных партий продукции для проверки их работоспособности и соответствия техническим спецификациям.

В настоящий момент микросхема ослабителя джиттера 5120AX015, а также сопутствующее программное обеспечение JitterGuard успешно завершены, микросхема включена в перечень электронной компонентной базы. Программный продукт был успешно применён при проведении государственных испытаний. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для электронной вычислительной машины №2024660382 Российская Федерация. JitterGuard: № 2024618218: заявл. 16.04.2024, опубл. 06.05.2024.

Разработанный автоматизированный стенд позволяет существенно повысить эффективность контроля электрических параметров производимых микросхем при одновременном сокращении времени испытаний. Предлагаемый подход может быть масштабирован и адаптирован для применения при разработке других типов микросхем.

К. В. Немчанов, Д. А. Попков, Е. С. Адамянц, И. А. Батырев
Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ НАСТРОЙКИ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Аннотация. Внедрение современной системы автоматизации обеспечивает возможность настройки резонаторов с минимизацией уровня дефектов, что существенно повышает общую эффективность и качество производственного процесса.

Ключевые слова: программное обеспечение, настройка резонаторов, графический интерфейс, автоматизированные измерения.

Для цитирования: Немчанов К. В., Попков Д. А., Адамянц Е. С., Батырев И. А. Автоматизированная система для настройки кварцевых резонаторов // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 326–328.

K. V. Nemchanov, D. A. Popkov, E. S. Adamyants, I. A. Batyrev
Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

AUTOMATED SYSTEM FOR TUNING QUARTZ RESONATORS

Abstract. The introduction of a modern automation system provides the ability to tune resonators while minimizing the level of defects, which significantly increases the overall efficiency and quality of the production process.

Keywords: software, resonator, tuning of resonators, graphical interface, automated measurements.

For citation: Nemchanov K. V., Popkov D. A., Adamyants E. S., Batyrev I. A. Automated system for tuning quartz resonators // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 326–328.

В условиях необходимости обеспечения технологического суверенитета России развитие микроэлектроники является одной из важнейших задач приводящих к повышению требований научной и производственной эффективности. На текущий момент многие предприятия из отрасли микроэлектроники применяют оборудование, созданное еще в 80-90х годах 20-го века, с устаревшими системами контроля и управления. Несмотря на то, что такого рода оборудование зарекомендовало себя как стабильное и точное, способное к выпуску продукции, соответствующей текущим стандартам, устаревшие системы управления приводят к снижению точности работы и эффективности производства. В условиях стремительного технологического прогресса становится актуальной задача по модернизации систем контроля и управления для такого рода оборудования, что позволит значительно повысить их функциональность.

В частности, установка «Альфа-Н», предназначенная для настройки частоты кварцевых резонаторов, была разработана в 80-х годах, управляется через устаревший контроллер и не актуальное программное обеспечение (далее – ПО), что приводит к ряду проблем, а именно: зависимость от используемого ПО; затруднительное применение устаревшего измерительного оборудования; отсутствие масштабируемости; использование ограниченного диапазона частот до 100 МГц; неинформативный интерфейс программы. Отсутствие актуального ПО снижает не только удобство, но эффективность работы.

Несмотря на существующие ограничения, установка «Альфа-Н» демонстрирует стабильную производительность в процессе настройки частоты кварцевых резонаторов. Настройка осуществляется методом дополнительного напыления металлов или диэлектриков на резонатор с использованием термического испарения. Система предназначена для настройки 24 резонаторов в рамках одного технологического цикла. Кварцевые резонаторы размещаются в специализированных гнездах на подвижной карусели, приводимой в движение внешним электродвигателем. Координацию работы карусели осуществляет модуль управления на базе AT89C51. Конструкция пушки позволяет создавать вокруг резонатора облако ионов аргона, которые удаляют электронное покрытие с пьезоэлемента, подготавливая поверхность к нанесению слоев металлизации. Этот процесс также контролируется модулем управления. По мере нанесения слоев выполняется контроль выходной частоты резонатора с помощью электронносчетного частотомера ЧЭ-34А, подключенного к модулю управления по параллельной шине данных. Контроллер имеет интерфейс передачи данных RS232, что позволяет обмениваться данными с ПО, установленным на стационарном компьютере. Именно через это ПО задаются необходимые параметры и обеспечивается автоматизация процесса настройки частоты резонаторов.

При обновлении системы контроля и управления установки «Альфа-Н» был применен актуальный подход к разработке ПО «ALPHA-N CONTROL» с использованием языка программирования C++11. ПО представляет собой приложение, устанавливаемое на персональный компьютер, с графическим интерфейсом, содержащим элементы управления (рис. 1.)

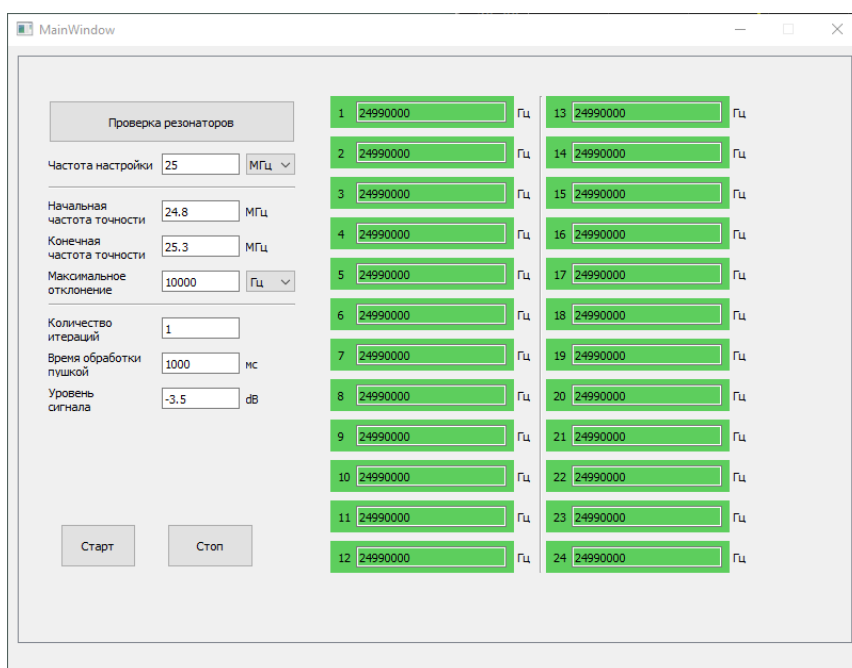


Рис. 1. Графический пользовательский интерфейс приложения «ALPHA-N CONTROL»

В качестве прибора для измерения частоты выходного сигнала с настраиваемого резонатора был выбран анализатор сетей OBZOR-304/1. Прибор OBZOR-304/1 предназначен для измерений комплексных коэффициентов передачи и отражения (S-параметры). Управление осуществляется при помощи технологии передачи текстовых сообщений стандарта SCPI, для этого в ПО применена библиотека visa32.lib. OBZOR-304/1 обладает функцией генерации сигнала в диапазоне до 300 МГц и выше, который

подается на вход исследуемого резонатора, вызывая в нем резонанс. Устаревший контроллер был заменен на ATmega GA2560, установленный на плате Arduino Mega2560. Данное решение имеет на борту цифровые выводы, позволяющие осуществлять управление набором реле SRD-05VDC-SL-C. Реле необходимы для запуска электродвигателя (смена настраиваемого резонатора) и активации электронной пушки. Для управления реле применяется передача команд по интерфейсу последовательной связи Serial. Для обеспечения информативности ПО и упрощения управления применяется графический пользовательский интерфейс GUI, который строится на базе QtApplication.

Разработанное ПО обеспечивает настройку микроконтроллера, инициализацию и взаимодействие с OBZOR-304/1, а также автоматизированный контроль за измерениями частоты резонатора. ПО осуществляет управление процессом измерений и настраивает точность проводимых операций. В результате этих изменений была разработана схема подключения, представленная на (рис. 2).

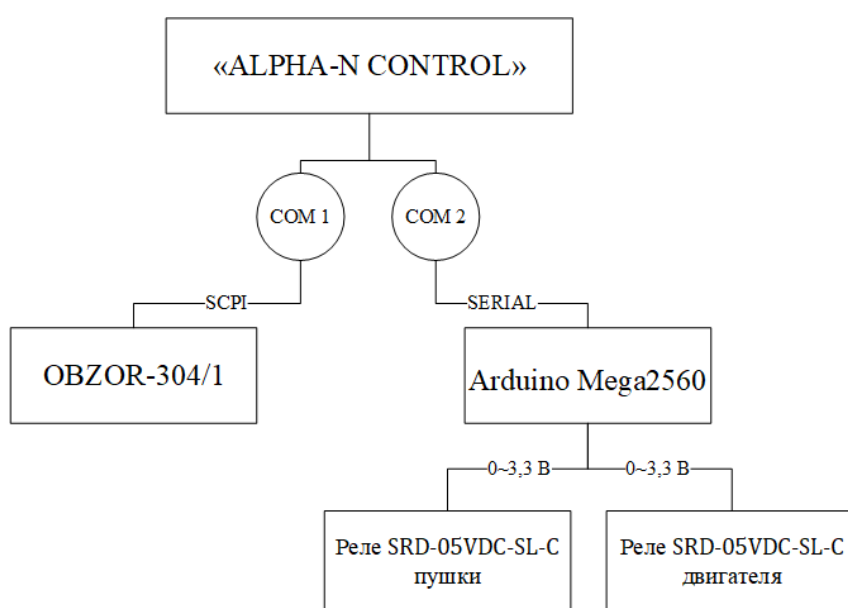


Рис. 2. Схема подключения контрольно-управляющих устройств

Приложение ALPHA-N CONTROL позволяет проводить настройку резонатора в полностью автоматическом режиме. Оператору установки необходимо только непосредственно проводить установку резонаторов в специальные гнезда на карусели. Результаты проведения настройки отображаются на экране оператора в режиме реального времени. При этом возможность задачи тонких настроек работы системы позволяют достичь необходимых характеристик по точности настраиваемых образцов. Такие функции позволяют получить готовый продукт с минимальным уровнем брака, и снижают уровень влияния человеческого фактора.

В результате была проведена модернизация системы контроля и управления установкой «Альфа-Н», обновлено ПО и внедрены новые технологические решения, повышающие масштабируемость системы. Использование современного измерительного прибора позволило расширить диапазон настраиваемых частот резонаторов до 300 МГц. Обновленный графический интерфейс значительно повысил удобство работы с установкой. Данная модернизация приводит к увеличению информативности, улучшению общей эффективности и качества производственного процесса.

П. А. Пятанова^{1,2}, Т. В. Ложникова²

¹Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского
Омск, Российская Федерация

²Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ПЛАСТИН КАТАНГАСИТА

Аннотация. Подобран химический состав раствора и условия травления пластин катангасита: бромид аммония 40%, фтороводородная кислота 44%, в объемном соотношении 1:3 при температуре 50 °С. Скорость травления в подобранном растворе составляет 1,7 мкм/мин, поверхность пластины сохранена, амплитудно-частотная характеристика соответствует требованиям.

Ключевые слова: химическое травление, катангасит, скорость травления, амплитудно-частотная характеристика.

Для цитирования: Пятанова П. А., Ложникова Т. В. Химическое травление пластин катангасита // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 329–330.

P. A. Pyatanova^{1,2}, T. V. Lozhnikova²

¹Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

CHEMICAL ETCHING OF CATANGASITE PLATES

Abstract. The chemical composition of the solution and the etching conditions for the catangasite plates were selected: 40% ammonium bromide, 44% hydrofluoric acid, in a volume ratio of 1:3 at a temperature of 50°C. The etching rate in the selected solution is 1.7 μm/min, the plate surface is preserved, the amplitude-frequency characteristic meets the requirements.

Keywords: chemical etching, catangasite, etching rate, amplitude-frequency characteristic.

For citation: Pyatanova P. A., Lozhnikova T. V. Chemical etching of catangasite plates // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 329–330.

Современная акустоэлектроника ориентирована на поиск новых пьезоэлектрических кристаллов с улучшенными термическими свойствами и высокими пьезоэлектрическими константами. Перспективным направлением последнего десятилетия стали материалы группы лантангаллиевого силиката (лангасита), которые, подобно кварцу, обладают точечной группой симметрии 32 и высокой термостабильностью. Хотя их электромеханические коэффициенты связи ниже, чем у ниобата лития, они в несколько раз превосходят кварц. Новым материалом, синтезированным в России компанией АО «Фомос-Материалы», имеющим высокое значение коэффициента электромеханической связи (в 3-4 раза выше кварца), является катангасит - монокристаллы семейства лангасита. Разработка технологии химического травления пластин катангасита с определенной скоростью для получения заданной частоты резонанса пластин, является весьма актуальной темой.

Цель данной работы подобрать состав раствора и условия для химического травления пластин катангасита со скоростью не менее 0,5 мкм/мин, для получения пластин с заранее заданными параметрами частоты резонанса.

В данном исследовании был применен химический способ травления. Катангасит – кальций-галлотанталатовый силикат – имеет химическую формулу $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ и обладает высокой химической стойкостью. Исходя из химического состава катангасита и результатов ранее проведенных нами исследований по травлению кварца были выбраны для исследования три группы травителей, различающихся по составу и механизму действия: $\text{HF}+\text{HNO}_3+\text{H}_2\text{O}_2$; $\text{HF}+\text{NH}_4\text{Br}$ и $\text{HF}+\text{CH}_3\text{COOH}$. В ходе травления исследовалось влияние химического состава раствора, металлов создаваемой микрогальвано-пары и температуры процесса (20 °C, 50 °C) на скорость травления. В каждом режиме на образцах проводилось три параллельных испытания.

Для оценки скорости травления был выбран метод, основанный на определении изменения частоты резонанса пластины до и после травления. В ходе эксперимента использовались образцы, выполненные в виде прямоугольных тонких пластинок катангасита. Резонансная частота пластин катангасита измерялась с помощью прибора для исследования амплитудно-частотных характеристик.

При использовании смеси концентрированных плавиковой (44%) и азотной (65%) кислот с добавкой перекиси водорода (12%), в объемном соотношении 1:2:2 и температуре 20 °C удалось достичь максимальной скорости травления $2,64\pm 0,03$ мкм/мин, однако сильно разрушалась поверхность пластины, что сопровождалось понижением основного сигнала резонансной частоты. При меньшем объемном содержании азотной кислоты в травителе, с созданием микрогальванопар с никелевой и нихромовой проволоками при температуре 20 °C удалось добиться высокой скорости травления $2,06\pm 0,03$ и $1,12\pm 0,02$ мкм/мин, но поверхность пластины была разрушена, амплитудно-частотная характеристика пластин не соответствовала требованиям. Травильный раствор на основе бромид аммония 40% и фтороводородной кислоты 44%, в объемном соотношении 1:3 показал высокую скорость травления с сохранением поверхности пластины и амплитудно-частотной характеристики, при повышенной температуре 50 °C скорость травления составляет $1,74\pm 0,03$ мкм/мин, при температуре 20 °C – $0,70\pm 0,01$ мкм/мин. При обратном объемном соотношении 3:1 указанных реагентов (бромид аммония-плавиковая кислота) в аналогичных условиях скорость травления ниже и составила $1,06\pm 0,1$ мкм/мин при температуре 50 °C. Третья группа травителей, содержащая в составе $\text{HF}+\text{CH}_3\text{COOH}$ показала низкие скорости травления менее 0,56 мкм/мин при температурах 25-50 °C, однако поверхность пластины и амплитудно-частотная характеристика соответствовали требованиям для всех вариаций в составе.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы - подобран состав раствора для химического травления пластин катангасита: бромид аммония 40%; фтороводородная кислота 44%, в объемном соотношении 1:3 при температуре 50 °C. Скорость травления в подобранном растворе составляет 1,7 мкм/мин, поверхность пластины сохранена, амплитудно-частотная характеристика соответствует требованиям.

И. А. Салихов, В. Н. Перебатов, А. П. Эрман

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина
Снежинск, Российская Федерация

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТВОДЯЩИХ СЛОЁВ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Аннотация. Отвод тепла от радиоэлектронных элементов является проблемой, которая возникает в каждом приборе. Рассмотрены несколько вариантов отвода тепла с помощью печатной платы. Среди них отвод тепла с помощью небольшого металлического пятка «медной монеты», а также с помощью отдельного слоя из металлической пластины. Подробно рассмотрен отвод тепла с помощью теплоотводящих слоёв самой печатной платы.
Ключевые слова: «медная монета», многослойная печатная плата, теплоотводящий слой, отвод тепла от радиоэлектронных компонентов, печатная плата.

Для цитирования: Салихов И. А., Перебатов В. Н., Эрман А. П. Опыт использования теплоотводящих слоёв многослойной печатной платы // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск : ОНИИП, 2025. С. 331–331.

I. A. Salikhov, V. N. Perebatov, A. P. Erman

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics
Snezhinsk, Russian Federation

EXPERIENCE IN USING HEAT-DISSIPATING LAYERS OF A MULTILAYER PRINTED CIRCUIT BOARD

Abstract. Heat removal from radio electronic elements is a problem that occurs in every device. The report examines several options for heat dissipation using a printed circuit board. These include heat removal using a small metal pad ("copper coin"), as well as using a separate layer of a metal plate. Heat removal by means of heat-dissipating layers of the printed circuit board itself is considered in detail.

Keywords: "copper coin", multilayer printed circuit board, heat dissipating layer, heat removal from electronic components, printed circuit board.

For citation: Salikhov I. A., Perebatov V. N., Erman A. P. Experience in using heat-dissipating layers of a multilayer printed circuit board // Radio Engineering, Electronics & Communication : Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk : ONIIP, 2025. P. 331–331.

Отвод тепла от элементов является проблемой, которая возникает почти в каждом приборе, чаще всего элементы выносят на корпус прибора, этот вариант позволяет решить вопрос на прибегая к специальным радиаторам если речь идёт о двух-трёх таких элементах. Если требуется отвести тепло от гораздо большего числа элементов, тогда могут возникнуть затруднения. Для решения этого вопроса был изучен отвод тепла с помощью печатной платы.

Были рассмотрены существующие варианты отвода тепла с помощью встроенного в плату металлического теплоотвода и с помощью металлической теплоотводящей пластины. Более подробно рассмотрен вариант отвода тепла с помощью теплоотводящих слоёв печатной платы. Было изучено как влияет конфигурация площадки элемента и металлизация слоя на обратной стороне платы.

А. Е. Уразбеков, П. Е. Троян, Ю. В. Сахаров

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Томск, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ ОСТРОВКОВЫХ ПЛЕНОК АЛЮМИНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ МЕМРИСТОРА

Аннотация. Представлена возможность применения островковых пленок алюминия в структурах металл/диэлектрик/металл, изготовленных на стеклянных подложках. Образцы были получены методом магнетронного распыления компонентной мишени. Островковые пленки получены с применением ультразвуковых колебаний подложки. Данное техническое решение демонстрирует уменьшение разброса рабочих напряжений мемристора и устойчивость к циклам переключения не менее чем в два раза.

Ключевые слова: резистивное переключение, островковые пленки, оксид меди, оксид титана.

Для цитирования: Уразбеков А. Е., Троян П. Е., Сахаров Ю. В. Применение островковых пленок алюминия для улучшения воспроизводимости параметров мемристора // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 332–333.

A. E. Urazbekov, P. E. Troyan, Y. V. Sakharov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

USING ISLAND ALUMINUM FILMS TO IMPROVE THE REPRODUCIBILITY OF MEMRISTOR PARAMETERS

Abstract. The paper considers the use of aluminum island films in metal/dielectric/metal structures made on glass substrates. The samples were obtained by magnetron sputtering of a component target. The island films were obtained using ultrasonic vibrations of the substrate. This technical solution demonstrates a reduction in the operating voltage spread of the memristor and resistance to switching cycles by at least two times.

Keywords: resistive switching, island films, copper oxide, titanium oxide.

For citation: Urazbekov A. E., Troyan P. E., Sakharov Y. V. Using island aluminum films to improve the reproducibility of memristor parameters // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 332–333.

Элемент резистивной памяти представляет собой структуру металл/диэлектрик/металл, где в качестве металла выступает алюминий, а в качестве диэлектрика – слой, полученный магнетронным распылением мишени титана с медными пластинками на ней в атмосфере воздуха при токе разряда 200 мА и давлении 6×10^{-3} мм рт. ст. Нижний электрод осаждается на подложку, жестко соединенную с пьезокерамическим излучателем, на который подается переменное напряжение с частотой 1,7 МГц, совпадающей с резонансной модой колебания пьезокерамического излучателя. Полученная структура представлена на рис. 1. Аксиальное распределение островков электрода мемристора имеет множество пиков, но преобладающая высота островков около 60–70 нм (АСМ-изображение поверхности нижнего электрода на рис. 2). Диапазон толщины диэлектрического слоя, при котором проявляется эффект резистивного переключения лежит в интервале от 90 до 450 нм, что является подходящей для реализации данного технического решения.



Рис. 1. Схематическое представление структуры мемристора с островковым нижним электродом

Для мемристора, выполненного при тех же условиях, но без островкового нижнего электрода, переключение описывается следующим образом. При подаче на мемристор возрастающего напряжения до напряжения переключения (применительно к структуре с диэлектрическим слоем порядка 150 нм напряжение переключения $\sim 3,6$ В) сопротивление структуры 5×10^7 Ом. Переход в низкоомное состояние объясняется случайным образованием токопроводящих нитей в объеме диэлектрического слоя в силу достижения в нем критической напряженности электрического поля.

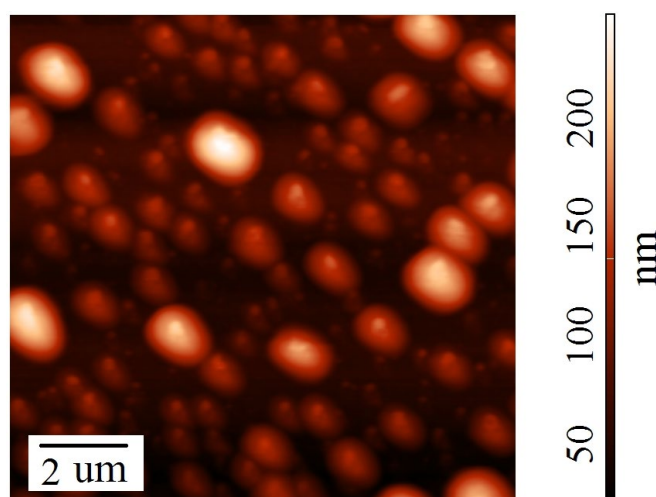


Рис. 2. Изображение поверхности нижнего электрода

Далее сопротивление структуры 4×10^5 Ом, которое сохраняется после отключения питания. Другими словами, $R_{\text{off}} / R_{\text{on}} \sim 120$. При подаче напряжения обратной полярности мемристор вновь переходит в состояние с низким сопротивлением, но на порядок ниже 6×10^6 Ом. Второй цикл имеет параметр $R_{\text{off}} / R_{\text{on}} \sim 70$, для 10-ого цикла этот же параметр уже порядка 10. Для структуры с островковым нижним электродом той же толщины диэлектрического слоя параметр $R_{\text{off}} / R_{\text{on}} \sim 100$ для первого цикла, но для 10-ого цикла $R_{\text{off}} / R_{\text{on}} \sim 35$. Стоит обозначить, что напряжение переключения со 2-го по 10-ый цикл переключения для мемристора без использования островкового электрода изменялось в пределах 10%, а для мемристора с нижним островковым электродом разброс рабочих напряжений не превышал 5%.

Работа выполнена командой научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FEWM 2024-0004.

В. А. Чуклин, А. И. Воронкова, Д. А. Аглиулина

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАДИОПРОЗРАЧНОСТИ КОНСТРУКТИВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. Рассмотрено, каким образом изменение плотности заполнения и выбор геометрии рисунка поддержек для образцов, изготавливаемых методами аддитивных технологий, позволяет получить прочные детали с необходимыми для радиоэлектронных устройств требованиями к радиопрозрачности. Исследовано влияние типов материалов печати, степеней заполнения при печати, внутренних паттернов заполнения на радиопрозрачные свойства радиоэлектронных устройств.

Ключевые слова: аддитивные технологии, паттерны, 3D печать, радиопрозрачность, метод послойного наплавления.

Для цитирования: Чуклин В. А., Воронкова А. И., Аглиулина Д. А. Исследование свойств радиопрозрачности конструктивов, полученных методами аддитивных технологий // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (7–8 октября 2025 года, Омск, Россия). Омск: ОНИИП, 2025. С. 334–336.

V. A. Chuklin, A. I. Voronkova, D. A. Agliulina

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

THE RADIOTRANSparency STUDY OF STRUCTURES MANUFACTURED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES

Abstract. It is clear from this article how changing the filling density and selecting the geometry of the support pattern for samples manufactured by additive technologies allows obtaining durable parts with the radiotransparency requirements necessary for electronic devices. The article studies the influence of print material types, printing filling levels, and internal filling patterns on the radiotransparency properties of electronic devices.

Keywords: additive technologies, patterns, 3D printing, radiotransparency, fused deposition method.

For citation: Chuklin V. A., Voronkova A. I., Agliulina D. A. The radiotransparency study of structures manufactured by additive technologies // Radio Engineering, Electronics & Communication: Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference (October 7–8, 2025, Omsk, Russia). Omsk: ONIIP, 2025. P. 334–336.

Технологии аддитивного производства позволяют предприятиям выводить изделия на рынки сбыта в возможно короткие сроки по сравнению с классическими технологиями подготовки, проектирования и изготовления изделий. Аддитивные технологии позволяют эффективно и быстро создавать геометрически сложные формы и изделия, являясь инновационным подходом для создания компактных беспилотных летательных аппаратов, разработке биоразлагаемых медицинских имплантов, антенных кожухов, уровень радиопрозрачности компонентов которых необходимо тем или иным путем корректировать.

Проектирование деталей и узлов для электронных устройств осуществляется в прямой зависимости от материала, выбранного для того или иного типа аддитивного производства. Состав и свойства материалов, являющихся основой 3D-печати, можно

корректировать и изменять. Путём добавления различных частиц в филаменты и смолы можно добиться различных прочностных, оптических, весовых и прочих характеристик, предъявляемых к тому или иному узлу.

Аддитивное производство располагает множеством методов и технологий. В зависимости от выбранного метода и технологии 3D-печати мы можем получить изделия, обладающие различным функционалом, а также свойствами, присущими определенной сфере применения. С появлением новых технологий аддитивного производства растет и количество применяемых базовых материалов.

Среди самых распространенных методов 3D-печати можно выделить экструзионный и порошковый метод, а также метод полимеризации фотополимеров.

Основными технологиями аддитивного производства являются: моделирование методом послойного наплавления, производство произвольных форм электронно-лучевой плавкой, прямое лазерное спекание металлов, электронно-лучевая плавка, выборочная лазерная плавка, выборочное тепловое спекание, выборочное лазерное спекание, струйная трехмерная печать, изготовление объектов методом ламинирования, стереолитография и цифровая светодиодная проекция.

Самой простой в освоении является технология 3D-печати моделирования методом послойного наплавления. Затраты на приобретение промышленных единиц оборудования существенно ниже технологий порошкового спекания лазером, позволяющих осуществлять печать индустриальными материалами. Технология послойного наплавления печати обладает самым большим количеством, применяемых материалов, которые к тому же можно армировать различными типами добавок. Эта особенность является главной отличительной чертой технологии 3D-печати методом послойного наплавления. Широкое применение в рамках данной технологии приобрели такие материалы как ABS, PETG и PLA.

Для данного исследования был выбран метод послойного наплавления в виду его экономической эффективности и возможности применения широкого спектра материалов для 3D-печати.

С целью исследования свойств радиопрозрачности материалов был осуществлен выбор соответствующих материалов: ABS, PETG, ASA, HIPS.

Все материалы были приобретены у поставщика и производителя Bestfilament и имеют следующие характеристики.

Материал ABS

Предел прочности при изгибе (МПа) 65.

Ударная вязкость (кДж/м²) 10-15.

Теплостойкость (°C) 85-100.

Предел прочности при растяжении (МПа) 40-50.

Плотность (г/см³) 1,04.

Твердость R105-R110.

Модуль упругости (ГПа) 2,1.

Материал PETG

Предел прочности при изгибе (МПа) 70-80.

Ударная вязкость (кДж/м²) 6-8.

Теплостойкость (°C) 70-80.

Предел прочности при растяжении (МПа) 50-60.

Плотность (г/см³) 1,29.

Твердость R106-R108.

Модуль упругости (ГПа) 2,0-2,2.

Материал ASA.

Предел прочности при изгибе (МПа) 24.

Теплостойкость (°C) -40+90.

Предел прочности при растяжении (МПа) 43.

Плотность (г/см³) 1,08.

Твердость 83 по Шору.

Модуль упругости (ГПа) 1,35.

Материал HIPS.

Предел прочности при изгибе (МПа) 37,6.

Теплостойкость (°C) -40+70.

Предел прочности при растяжении (МПа) 16,4.

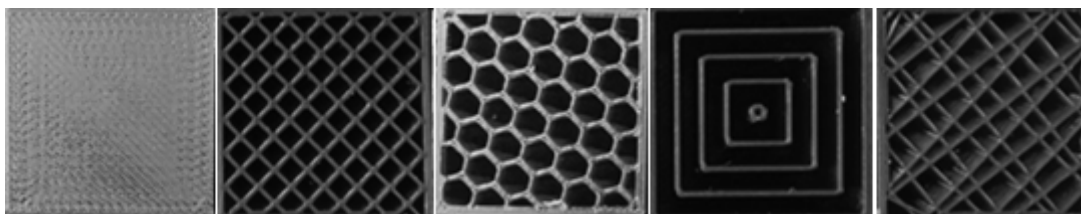
Плотность (г/см³) 1,05.

Твердость 79 по Шору.

Модуль упругости (ГПа) 1,35.

После разработки и подготовки 3D-моделей к печати, методом послойного наплавления было изготовлено всего 68 образцов деталей (из 4 типов материалов по 4 образца в партии). Образцы были напечатаны на принтере RAISE 3D Pro 3 на типовых режимах, рекомендуемых производителем материалов. Для проверки влияния геометрии паттерна было выбрано 5 основных типов паттернов заполнения, представленных на рисунке (100%-ое заполнение, сетка, соты, прямолинейное заполнение). Были определены необходимые степени заполнения внутреннего конструктива деталей паттернами: 10%, 25%, 50%, 75% и 100%.

Следующим шагом после изготовления были определены параметры относительной диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$. Измерения значений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь осуществлялись методом металлодиэлектрического резонатора в соответствии с ГОСТ Р 8.623.



Паттерны заполнения внутреннего конструктива

В данном исследовании были определены значения, которые следует учесть при проектировании деталей и узлов, изготавливаемых методом послойного наплавления. Самые оптимальные значения были зафиксированы на конструктивах в которых обеспечивались следующие параметры: диэлектрическая проницаемость ϵ составила от 1,4 до 2,1, тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ составил от 0,0020 до 0,004. Было выявлено увеличение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в прямой зависимости от увеличения процента заполнения внутреннего объема образцов.

Полученные результаты исследования показывают возможность применения аддитивных технологий, в частности метода печати послойным наплавлением, при разработке и изготовлении радиоэлектронных устройств и антенн. В рамках исследования были определены основные факторы, влияющие на радиопрозрачность элементов изготавливаемых с использованием аддитивных технологий: выбор основного конструкционного материала; изменение процента заполнения при печати изделия; выбор паттерна заполнения.