

На правах рукописи

Рыбаков Алексей Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОНФИГУРАЦИИ ЭКВАЛАЙЗЕРА
С ВАРЬИРУЕМОЙ ДЛИНОЙ ПРЕАМБУЛЫ ДЛЯ СИСТЕМ
ДАЛЬНЕМАГИСТРАЛЬНОЙ СВЯЗИ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре беспроводных технологий и систем.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Фокин Григорий Алексеевич

Официальные оппоненты: **Никульский Игорь Евгеньевич**
доктор технических наук, с.н.с.,
Публичное акционерное общество «Центральное научно-производственное объединение «Ленинец»,
главный специалист отдела 133, зам. главного конструктора

Рашич Андрей Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого,
Высшая школа прикладной физики и космических
технологий института электроники и
телекоммуникаций, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное учреждение
«Национальный исследовательский центр
телекоммуникаций имени М.И. Кривошеева»,
г. Москва

Защита состоится 17 декабря 2025 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 16 октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Способность коротких волн (КВ) отражаться от ионосферы Земли на высотах 100-350 км позволяет осуществлять сеансы связи на расстояниях со сложным рельефом местности в несколько тысяч километров далеко за линией горизонта без ретрансляторов и обуславливает уникальность таких систем дальнемагистральной связи декаметрового (ДКМ) диапазона для абонентов. Недостатком такого вида радиосвязи является известная проблема многолучевости ионосферного канала и, как следствие, изменчивость параметров частотных каналов в пространстве и времени, что приводит к недостаточной стабильности ДКМ радиолиний. По таким каналам возможна относительно низкоскоростная передача текстовой или голосовой информации. Актуальность и востребованность дальнемагистральной связи ДКМ диапазона обусловлена тем, что она широко используется в труднодоступной местности, являясь альтернативой более дорогой спутниковой связи, а также как резервный вид связи в случае чрезвычайных ситуаций.

В настоящее время совершенствование дальнемагистральной связи ДКМ диапазона идет по пути динамической организации радиолиний ионосферного канала с переключением радиочастот и параметров модуляций на основе текущего анализа радиоэлектронной обстановки. Спецификой переключения частот является ограничение допустимого используемого диапазона от наименьшей применимой частоты (НПЧ) до максимальной применимой частоты (МПЧ), которое определяется как протяженностью радиотрассы, так и текущим состоянием ионосферы. Для повышения помехоустойчивости ДКМ радиолиний необходима методология научно-обоснованной настройки конфигурации приемопередающего тракта к постоянно изменяющимся параметрам ионосферного радиоканала в отдельном сеансе связи.

Для оценки помехоустойчивости ДКМ радиолиний используют следующие показатели: 1) достоверность передачи; оценивается по вероятности ошибки приёма элемента сигнала или битовой ошибки; критерием качества выступает допустимая вероятность ошибки, которая зависит от вида модуляции и используемых мер по повышению помехоустойчивости; 2) своевременность передачи; оценивается по вероятности того, что время, затраченное на передачу сообщений, не превысит допустимого значения при условии выполнения требований по достоверности.

Согласно известным моделям ДКМ радиолиний К. Ватерсона и А.Н. Казанцева, изменения концентрации электронов в ионосфере влияют на высоту переотражения электромагнитной волны, что приводит к флуктуациям мощности огибающей и доплеровским смещениям, негативно сказывающимся на качестве связи. Поэтому настройка конфигурации приемопередающего тракта в ДКМ радиолиниях в диапазоне частот от 3 до 30 МГц представляется нетривиальной задачей и требует научно-обоснованного выбора параметров на заданный временной интервал, соответствующий сеансу связи, который может длиться от нескольких минут до суток.

Для настройки приемопередающего тракта в ДКМ радиолиниях целесообразно применять методы цифровой обработки сигналов, которые уже нашли широкое применение. В частности, использование адаптивных эквалайзеров позволяет компенсировать флуктуации до 20 дБ и значительно повышает помехоустойчивость.

Разработанность темы исследования. Существенный вклад в развитие расчетных моделей радиотрассы и методов построения адаптивных эквалайзеров для ионосферных ДКМ радиолиний внесли отечественные ученые О.В. Горячкин, В.И. Джиган, С.С. Аджемов и др. и зарубежные специалисты С. Douglas, J. Cardoso и др. Вопросы построения программно-конфигурируемых ДКМ радиолиний рассмотрены в

работах J. Smaragdis, B. Ramcumar. В России в настоящее время адаптивными системами ионосферной связи занимаются следующие научные и образовательные организации: Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ), Институт солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН, Марийский государственный университет, Ростовский государственный университет (РГУ), Поволжский государственный технологический университет, Филиал НИЦ Телеком в городе Самаре, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ). Из анализа данных работ можно утверждать, что существующие методы построения адаптивных эквалайзеров ДКМ радиолиний основаны на: 1) итеративной адаптации параметров; 2) использовании статистик оцениваемых параметров высоких порядков.

Исследованиям в области систем диагностики ионосферы и широкополосных декаметровых радиоканалов (коротковолновых каналов) посвящены работы отечественных ученых В.А. Иванова, Д.В. Иванова, А.П. Потехина, Н.В. Рябовой, О.Н. Шерстюкова, А.Д. Акчурина, С.А. Колесника, В.П. Дворковича, Н.В. Рябовой, Н.А. Конкина, В.В. Овчинникова, А.В. Дворковича, Ю.А. Чернова и др., а также зарубежных специалистов G.H. Barry, S. Salous, A.W. Pool и др. В данных работах описаны методы радиозондирования ионосферы, подтверждающие непостоянство ДКМ радиолиний, которое целесообразно компенсировать следующими подходами: 1) переходами на другие рабочие частоты; 2) адаптивным выбором сигнально-кодовых конструкций (СКК); 3) применением других методов. Существенный вклад в области радиозондирования ионосферы для повышения помехоустойчивости ДКМ радиолиний внесли отечественные ученые Н.П. Данилкин, Н.В. Рябова, С.А. Колесник, Д.В. Иванов, В.В. Овчинников, О.Н. Шерстюков.

Несмотря на существенный вклад данных работ по дальнемагистральной связи ДКМ диапазона в обобщенную задачу повышения помехоустойчивости посредством адаптации с использованием слепых эквалайзеров, актуальной и не до конца решенной в существующих системах прототипах ПИРС, Р-016, Сердолик и Mesa остается задача разработки методологии настройки приемопередающего тракта с конфигурируемым для текущего сеанса связи эквалайзером на приемной стороне посредством вариативного выбора длины преамбулы на передающей стороне.

Специфика управления длиной преамбулы на передаче для повышения помехоустойчивости на приеме определяется следующими обстоятельствами. Приемный эквалайзер является адаптивным фильтром и состоит из ряда ячеек, каждая из которых задерживает дискретный отсчет поступающего сигнала. Количество этих ячеек определяет длину адаптивного фильтра. Суть адаптации заключается в возможности изменения показателя задержки. Это изменение происходит с заданным шагом, величина которого влияет на скорость адаптации. Важным фактором управления длиной преамбулы, который не был учтен ранее, является соотношение размера информационного сообщения к размеру преамбулы. Существующие методы, которые не учитывают этого соотношения, могут привести к недостаточной скорости адаптации и сложности в отслеживании быстрых изменений параметров радиоканала, что затрудняет их практическое применение.

В настоящей работе решается комплексная **научная задача** разработки, программной реализации и экспериментальной апробации конфигурационных файлов настройки эквалайзера с варьiruемой длиной преамбулы для сеанса связи с заданным отношением сигнал/шум.

Объектом исследования являются современные отечественные системы дальнемагистральной связи ДКМ диапазона.

Предметом исследования является модели и методы функционирования систем дальнемагистральной связи ДКМ диапазона.

Целью работы является повышение помехоустойчивости системы дальнемагистральной связи ДКМ диапазона.

Для достижения цели в работе решаются следующие **частные задачи**:

1. Разработка расчетной модели радиотрассы систем дальнемагистральной связи декаметрового диапазона для определения рекомендуемых параметров передачи для модели ионосферного канала.

2. Разработка конфигурационных файлов настройки эквалайзера для обеспечения передачи данных за сеанс радиосвязи в ДКМ радиолинии с заданной помехоустойчивостью с использованием программной реализации средствами имитационного моделирования в среде MatLab для модели рэлеевского канала.

3. Экспериментальная апробация комплексной модели ДКМ радиолинии, включающей расчетную модель радиотрассы, конфигурационные файлы настройки эквалайзера и полевые измерения профиля ДКМ радиолинии для научно-обоснованного выбора параметров передачи на основе отношения сигнал/шум с учетом различных длин преамбул.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработанная расчетная модель радиотрассы системы дальнемагистральной связи ДКМ диапазона в отличие от известных моделей учитывает комплекс параметров, включающий задаваемое для данного сеанса связи отношение сигнал/шум в ДКМ радиолинии, пересчитанные значения критических частот по прогнозам концентрации электронов, полученных из радиопрогнозов IRI (International Reference Ionosphere), а также доплеровский сдвиг для каждого слоя ионосферы.

2. Разработанные конфигурационные файлы настройки эквалайзера впервые учитывают соотношение размера информационного сообщения к размеру преамбулы для заданной в сеансе связи помехоустойчивости.

3. Экспериментальная апробация комплексной модели ДКМ радиолинии и приемного эквалайзера с конфигурационными файлами настройки и варьируемой длиной преамбулы впервые показала возможность работы при отношении сигнал-шум от 14 дБ с вероятностью ошибки не более 10^{-3} без предварительного зондирования ионосферы.

Теоретическая значимость работы заключается в совершенствовании расчетных моделей радиотрасс систем дальнемагистральной связи ДКМ диапазона, учитывающих комплекс параметров, включающий и критическую частоту и доплеровский сдвиг для каждого слоя ионосферы. Самостоятельную теоретическую значимость имеет научное обоснование варьирования длины преамбулы, как средства настройки эквалайзера в заданном сценарии помехоустойчивости.

Практическая значимость работы заключается в повышении точности расчета напряженности поля в точке приема с учетом задаваемого для данного сеанса связи отношения сигнал/шум в ДКМ радиолинии. Самостоятельную практическую ценность имеет подтверждение возможности работы ДКМ радиолинии при отношении сигнал/шум от 14 дБ с вероятностью ошибки 10^{-3} без предварительного зондирования ионосферы для сеансов связи продолжительностью несколько часов.

Совокупность полученных результатов позволяет говорить о решении комплексной научной задачи разработки, реализации и экспериментальной апробации приемного эквалайзера с конфигурационными файлами настройки и варьируемой

длиной преамбулы в заданном сценарии помехоустойчивости для сеансов связи продолжительностью несколько часов.

Результаты исследования внедрены в комплексной системе информационного обеспечения безопасности судоходства Северного морского пути с использованием каналов метеорной связи (СЧ ОКР «Болид») на предприятии АО Научно-производственное предприятие «Авиационная и Морская Электроника». Также результаты исследования внедрены в учебном процессе в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича по направлению 11.05.04 – «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи», профиль «Системы радиосвязи специального назначения» при изучении дисциплины «Радиоприемные устройства».

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теории передачи сигналов, распространения радиоволн, теории случайных процессов, а также методы имитационного моделирования и натурного эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

1. Расчетная модель радиотрассы системы дальнемагистральной связи ДКМ диапазона учитывает комплекс параметров, включающий задаваемое для данного сеанса связи отношение сигнал/шум в радиолинии, пересчитанные значения критических частот и доплеровский сдвиг для каждого слоя ионосферы, что повышает точность прогноза напряженности поля в точке приема по сравнению с известным программным обеспечением Voасар.

2. Конфигурация эквалайзера файлами настройки с варьируемой длиной преамбулы повышает помехоустойчивость систем дальнемагистральной связи ДКМ диапазона на 4 дБ по сравнению со случаем без использования настройки с максимальной длиной преамбулы.

3. Экспериментальная апробация радиолинии дальнемагистральной связи ДКМ диапазона и приемного эквалайзера с конфигурационными файлами настройки с варьируемой преамбулой показала возможность работы при отношении сигнал/шум от 14 дБ с вероятностью ошибки не более 10^{-3} .

Степень достоверности и апробация результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, используемых допущений и ограничений, непротиворечивостью результатов известным исследованиям, соответствием применяемых моделей физическим процессам в системах дальнемагистральной связи ДКМ диапазона, результатами имитационного моделирования и натурных испытаний экспериментальной апробации, широким спектром публикаций и выступлений на российских и международных конференциях.

Полученные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались со специалистами на Всероссийских и Международных конференциях по проблемам развития систем радиосвязи и обработке сигналов: Международная конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» 2015-2024 гг., научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов «НТК ППС» (2025 г.), Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики» (ПКМ-2024), Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (2016 г.); а также на научно-технической конференции «Приоритетные направления развития науки и технологий» (2016 г.) и Systems of Signal Synchronization Generating and Processing in Telecommunications - SYNCHROINFO 2018 (2018 г.), «2025 Systems of

signals generating and processing in the field of on board communications» - ONBOARD 2025, 80-й научно-техническая конференция СПб НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио (2025 г.)

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 32 работах; из них 7 работ опубликованы в журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ; 3 работы опубликованы в трудах, индексируемых в Scopus.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа выполнена по специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (пункты паспорта специальности: 1, 2, 3, 13).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и двух приложений. Работа содержит 148 страницы без учета приложений, 58 рисунков и 12 таблиц.

Личный вклад автора. Теоретические и практические исследования, проведенные расчеты, разработанные модели расчета, конфигурационных файлов настройки эквалайзера и рекомендации по построению комплексной модели ДКМ радиолинии для выбора параметров передачи в радиоканале на основании отношения сигнал/шум с применением варьируемых длин преамбул получены автором лично.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационного исследования, формулировку объекта, предмета, цели и задач работы, положения, выносимые на защиту, сведения о структуре, публикациях, новизне, практических результатах, методах исследования, использованных в работе.

Глава 1 посвящена анализу физических и математических моделей ионосферного радиоканала, а также обзору путей повышения помехоустойчивости систем дальнемагистральной связи ДКМ диапазона. Рассматриваются результаты анализа рабочих параметров, используемых на практике в качестве ключевых для описания помехоустойчивости ДКМ радиолиний. Обсуждаются возможности уточнения физической модели, лежащей в основе поведения указанных параметров, которые позволят добиться повышения помехоустойчивости ДКМ радиолиний для различных сценариев организации сеансов связи. На основе анализа состояния проблемы делается вывод о том, что существующие модели и методы повышения помехоустойчивости ДКМ радиолиний учитывают частные параметры критической частоты и доплеровского сдвига, однако методики комплексного их учета для каждого слоя ионосферы с задаваемым для сеанса связи отношением сигнал/шум в ДКМ радиолиниях до сих пор предложено не было. Раздельный учет параметров зачастую оказывается грубым и, как следствие, способным дать лишь приближенные данные по расчетам поля в точке приема. Комплексный учет, напротив, позволяет адаптироваться под изменяющиеся условия прохождения радиосигнала не только путем изменения, к примеру, индекса фазовой модуляции и ширины полосы сигнала, но и посредством ситуативной конфигурации других параметров ДКМ радиолинии на передаче, которые определяются отношением сигнал/шум в заданном сеансе связи на приеме.

Если в процессе работы ДКМ радиолинии происходит ухудшение отношения сигнал/шум на приемной стороне, то для поддержания ее работоспособности может оказаться более рациональным по сравнению с изменением СКК на передаче другой вариант решения. Таковым является снижение информационной части передаваемого пакета путем замещения его преамбулой увеличенной длины, которая служит для настройки приемного эквалайзера весовыми коэффициентами. Данный подход позволяет адаптироваться к уменьшенному отношению сигнал/шум на приемной стороне без пересчета бюджета приемопередающего тракта ДКМ радиолинии посредством изменения соотношения размера информационного сообщения к размеру преамбулы. Данный подход служит для повышения помехоустойчивости систем дальнемагистральной связи ДКМ диапазона с динамически изменяющимися условиями и образует комплексную **научную задачу** разработки, программной реализации и экспериментальной апробации конфигурационных файлов настройки эквалайзера с варьируемой длиной преамбулы для сеанса связи с заданным отношением сигнал/шум.

Глава 2 содержит разработанную методологию расчета напряженности поля в точке приема для радиотрассы системы дальнемагистральной связи ДКМ диапазона, которая учитывает комплекс параметров, включающий критическую частоту, доплеровский сдвиг для каждого слоя ионосферы и задаваемое для сеанса связи отношение сигнал/шум.

Известно, что распространение радиоволн в атмосфере сопровождается потерей части электромагнитной энергии при прохождении через слои атмосферы D и E , а также для декаметровых волн, отражающихся от слоя $F2$. Положительная рефракция может вернуть волну обратно на Землю. Поясним операции вычисления требуемых

характеристик сигнала на обобщенной модели расчета параметров ДКМ радиолинии. Предположим, что значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 1$, при $q_n \gg 90^\circ$. По принятым условиям запишем формулу расчета угла падения на нижнюю границу ионосферы, при котором волна вновь направляется в сторону земной поверхности:

$$\sin \varphi = \sqrt{e_{n(homp)_I}}, \quad (1)$$

где φ – угол входа луча в ионосферу, $e_{n(homp)_I}$ – относительная диэлектрическая проницаемость слоя ионосферы. Условие отражения представим:

$$\sin \varphi = 1 - \sqrt{81 \frac{N \varepsilon \left(\frac{\varepsilon_l}{\text{см}^3} \right) N \varepsilon \left(\frac{\varepsilon_l}{\text{см}^3} \right)}{f^2 (\text{кГц})}} \quad (2)$$

где концентрация электронов $N \varepsilon$ соответствует высоте отражения $h_{\text{отр}} = h_0 + z_{\text{отр}}$. Из (2) следует, что волна будет отражена на высоте $h_{\text{отр}}$ в ионосфере с частотой f

$$f = \frac{9 \sqrt{N \varepsilon \left(\frac{\varepsilon_l}{\text{см}^3} \right)}}{\cos \varphi} \quad (3)$$

В случае нормального падения при $\cos \varphi = 1$ волна будет отражена с частотой:

$$f = 9 \sqrt{N \varepsilon \left(\frac{\varepsilon_l}{\text{см}^3} \right)} = f_0 \quad (4)$$

С увеличением f отражение происходит на всё больших высотах, заканчиваясь на высоте с максимальной концентрацией свободных зарядов. Наивысшая частота, при которой волна ещё отражается от ионосферы при нормальном падении, называется критической и определяется выражением

$$f_{\text{кр}} = 9 \sqrt{N \varepsilon_{\text{max}}} = f_{0\text{max}} \quad (5)$$

При $f > f_{\text{кр}}$ диэлектрическая проницаемость ионосферы будет положительной $\varepsilon > 0$ и ионосфера станет радиопрозрачной. Критические частоты относятся к диапазону ДКМ [3 ÷ 30 МГц]. При известных средних значениях $N \varepsilon_{\text{max}}$ и полученных радиопрогнозах IRI в дневное время критическая частота равна $f_{\text{кр}} = 11 \div 13$ МГц, в ночное время критическая частота равна $f_{\text{кр}} = 4 \div 6$ МГц. В средних широтах Земли в дневное время критическая частота равна $f_{\text{кр}} = 6 \div 8$ МГц, а в ночное время – $f_{\text{кр}} = 2,5 \div 4,5$ МГц. Исключением являются районы Крайнего Севера в период полярного сияния, поскольку D -слой, благодаря своей высокой плотности, поглощает сигнал вместо его отражения. Плотность нейтральных, неионизированных частиц, которые составляют основную массу в этом регионе, в D -слое в 1000 раз выше, чем в E и F -слоях. Если отражение волны происходит при наклонном падении на ионосферу ($\varphi > 0$), частота радиоволны определяется по закону секанса:

$$f = \left(9 \sqrt{N \varepsilon \left(\frac{\varepsilon_l}{\text{см}^3} \right)} \right) / \cos \varphi = f_0 \sec \varphi \quad (6)$$

На больших расстояниях между точкой излучения и точкой приема справедливо следующее выражение для рабочей частоты:

$$f = K f_0 \sec \varphi_0 \quad (7)$$

где при расстояниях свыше 500 километров необходимо учитывать сферичность Земли и для этого вводят поправочный коэффициент K . Из (2) и (7) получим выражение для поправочного коэффициента:

$$K = \sqrt{\left(1 + \frac{2z_0}{(R_3 + h_0) \cos \varphi_0} \right) / \left(\frac{z_0}{(R_3 + h_0)} \right)} \sec \varphi_0 \quad (8)$$

где z_0 – это расстояние от нижней границы ионосферы до высоты с максимальной концентрацией свободных зарядов. С увеличением угла падения волна проникает глубже в ионосферу. При заданном угле падения с ростом рабочей частоты f отражение происходит на всё больших высотах. Наибольшая частота, на которой волна ещё испытывает отражение при данном угле падения, называется максимальной; с ее увеличением отражение происходит на всё больших высотах, где она становится:

$$f = \frac{9 \sqrt{N_{\text{э}} \left(\frac{\text{эл}}{\text{см}^3} \right)}}{\cos \varphi} = K \sqrt{N_{\text{э}} \left(\frac{\text{эл}}{\text{см}^3} \right)} \sec \varphi \quad (9)$$

Максимальный угол падения соответствует траектории, проходящей по касательной к поверхности Земли с углом φ_{max}

$$\sin \varphi_{\text{max}} = \frac{R_{\text{з}}}{R_{\text{з}} + h_0} \quad (10)$$

где h_0 – нижняя граница ионосферы. Максимальную частоту при максимальном угле входа в атмосферу, которая еще может отразиться в ионосфере, называют предельной:

$$f_{\text{кмакс}} N_{\text{э}} = \frac{9 \sqrt{N_{\text{э}} \left(\frac{\text{эл}}{\text{см}^3} \right)}}{\cos \varphi}, \quad f_{\text{кмакс}} \gg 4f_{\text{кр}} \quad (11)$$

В реальной ионосфере, например, при появлении спорадических слоев E_s , отражение может наступить при гораздо больших частотах. На границе раздела сред должны выполняться условия равенства тангенциальных составляющих векторов E и H (при отсутствии поверхностных токов в этих слоях), на основании чего для вертикально поляризованной волны можно составить систему двух уравнений:

$$E_{\text{м пад}} \cos \varphi - E_{\text{м отр}} \cos \varphi = E_{\text{м пр}} \cos \psi \quad (12)$$

$$H_{\text{м пад}} + H_{\text{м отр}} = H_{\text{м пр}} \quad (13)$$

Коэффициент отражения волны R определяется как отношение амплитуд $E_{\text{м пад}}/E_{\text{м отр}}$. Если свойства земли близки к идеальному диэлектрику, то из (13):

$$E_{\text{м пр}} = (E_{\text{м пад}} + E_{\text{м отр}}) / \sqrt{\varepsilon'_k} \quad (14)$$

Подставив (14) в (12) и поделив результат на $E_{\text{м пад}}$, перейдем к углу скольжения $\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$ и исключим угол ψ так, что справедливо выражение:

$$\cos \psi = \sqrt{1 - \sin^2 \psi} = \sqrt{(\varepsilon'_k - \cos^2 \theta) / \varepsilon'_k} \quad (15)$$

из которого можно записать формулу коэффициента отражения:

$$R_B = (\varepsilon'_k \sin \theta - \sqrt{\varepsilon'_k - \cos^2 \theta}) / (\varepsilon'_k \sin \theta + \sqrt{\varepsilon'_k - \cos^2 \theta}). \quad (16)$$

Если проводимость почвы $\sigma \neq 0$, то ε'_k является комплексной величиной, из чего следует комплексный характер членов (16), поэтому R_B можно представить в виде:

$$R_B = |R_B| e^{-i\beta_B}, \quad (17)$$

откуда следует, что при взаимодействии радиоволны с проводящей поверхностью Земли появляется сдвиг фаз между падающей и отраженной волнами на угол β_B . Данный вывод позволяет далее сделать заключение о том, что коэффициент отражения можно представить в виде вещественной величины:

$$R_B = \frac{\varepsilon' \sin \theta - \sqrt{\varepsilon' - \cos^2 \theta}}{\varepsilon' \sin \theta + \sqrt{\varepsilon' - \cos^2 \theta}} \quad (18)$$

Расчет напряженности электромагнитного поля (ЭМП) E_c ионосферной волны по представленной выше расчетной методике позволяет проводить оценку ЭМП для ДКМ радиолиний в средних широтах. Используются типовые данные радиопрогнозов и характеристики подстилающей поверхности (IRI), а также заданные параметры приемопередающего тракта. Напряженность поля в точке приема определяется из:

$$E = \frac{\sqrt{30P_1 G_1}}{r_{\text{л}}} \frac{1}{2} \frac{1+|\dot{R}|}{2} |\dot{R}|^{(n-1)(n-1)} e^{-\Gamma} \quad (19)$$

где P_1 – мощность передатчика; G_1 – коэффициент усиления антенны, $r_{\text{л}}$ – дальность распространения, равная длине луча ионосферной волны для n –скачковой радиотрассы; множители ослабления ионосферной волны определяются модулем коэффициента отражения от Земли $|\dot{R}|$ через полный коэффициент поглощения в ионосфере Γ . Множитель $1/2$ в (19) характеризует уменьшение мощности, переносимой волной, на 6 дБ. Общий интегральный коэффициент поглощения $e^{-\Gamma}$ представляет собой сумму частных интегральных коэффициентов поглощения в слоях D , E , F_1 , через которые проходит волна, и в слое F_2 , от которого волна отражается. При отражении от слоя E полный коэффициент поглощения Γ на частоте излучения f определяется по критическим частотам слоя E с использованием выражения:

$$\Gamma = \frac{3(f_0^E)^2 \sec \phi_0^E}{(f+f_L)^2} + 4 \frac{\cos^2 \phi_0^E}{f_0^E} f \sqrt{\frac{f}{(f+f_L)}} \quad (20)$$

Выражения (19) и (20) представляют собой усовершенствованную расчетную модель радиотрассы системы дальнемагистральной связи ДКМ диапазона, которая в отличие от известных моделей учитывает комплекс параметров, включающий и критическую частоту f_0^E и доплеровский сдвиг f_L . Для совершенствования типовой методики расчета напряженности поля в точке приема в ДКМ радиолинии был проведен расчет уровня ЭМП. Расчеты на n – скачковой радиотрассе выполняются не в одной точке, а на всей территории региона, и результаты представляются графически в двумерной системе координат. Суть усовершенствования сводится к использованию в формуле (19) коэффициента поглощения Γ (20) после пересчета критической частоты f_0^E по прогнозам концентрации электронов N_e в модели IRI.

На основе модели IRI также получены графики суточного изменения максимально применимых частот (МПЧ), которые рассылаются по различным местам (рис. 1). Оптимальная частота выбирается равной $f = 0,85$ МПЧ. Коэффициент 0,85 определяет высоту максимума ионизации слоя F_2 в предположении параболического распределения ионизации вблизи максимума и без учета запаздывания волны в нижележащих слоях ионосферы. Верхняя линия на рис. 1 демонстрирует значения МПЧ, взятые из модели IRI, а нижняя линия показывает используемые значения МПЧ. При действующей высоте слоя F_2 основные рабочие частоты (ОРЧ) оцениваются как:

$$f = 0.85 f_0 \quad (21)$$

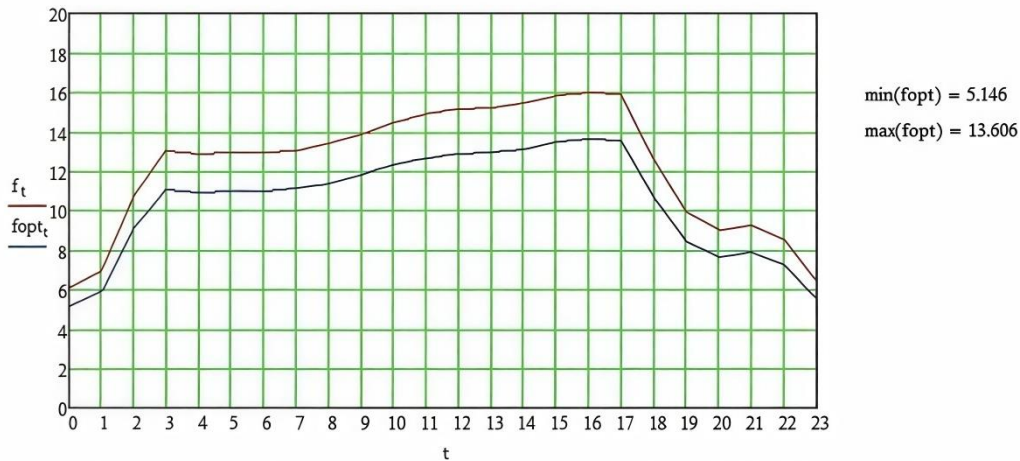
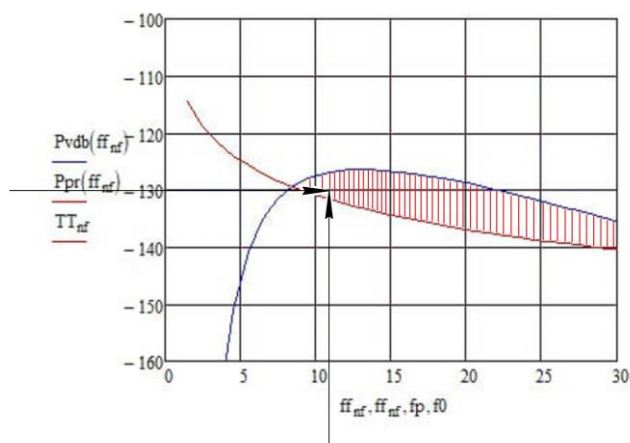


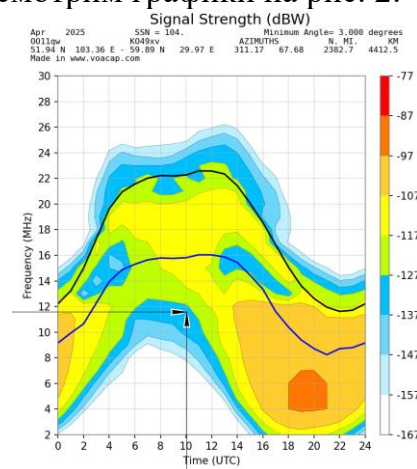
Рисунок 1 – График изменения МПЧ

Пересчет МПЧ при работе с ДКМ радиолинией позволяет определить рабочие диапазоны частот для передачи сигналов, учитывая условия ионосферы, время суток, климатические изменения и др. Основной задачей является выбор таких частот, которые будут отражаться и пропускаться через многослойную ионосферу в заданных условиях. Это позволяет обеспечить максимальную помехоустойчивость и дальность.

Представленная расчетная модель способствует повышению точности расчета напряженности поля в точке приема с учетом задаваемого для данного сеанса связи отношения сигнал/шум в ДКМ радиолинии в сравнении с результатами, полученными с использованием программного обеспечения Voасар за счет следующих факторов. Во-первых, расчетная модель интегрирует модели Казанцева и Ватерсона и учитывает адаптивность к ионосферным изменениям в ДКМ радиолинии, включая колебания плотности электронов и периоды высокой солнечной активности. Во-вторых, расчетная модель обеспечивает расчеты в реальном времени, что позволяет адаптироваться к текущим условиям в ДКМ радиолинии. В качестве примера, подтверждающего повышение точности расчета, рассмотрим графики на рис. 2.



а) расчетная модель оценки напряженности поля в точке приема



б) модель оценки мощности сигнала на приеме ПО Voасар

Рисунок 2 – График изменения уровней мощностей на приемной стороне для радиотрассы Санкт-Петербург – Иркутск

На рис. 2 представлены уровни мощностей на приемной стороне для радиотрассы Санкт-Петербург – Иркутск в 10 часов утра. Область пересечения двух кривых на рис. 2,а показывает диапазон частот, в рамках которого возможно осуществление связи при полосе 3 кГц для сигналов с уровнем минус 130 дБм, что соответствует отношению сигнал/шум примерно 14 дБ. Результат же модели Vocар на рис. 2, б показывают только диапазон уровней от минус 127 до минус 137 дБм.

Представленная расчетная модель оценки поля в точке приема и пересчета мощности сигнала и МПЧ на приемной стороне радиоканала в ДКМ радиолинии решает задачу научно обоснованного выбора параметров передачи в текущий момент времени и предназначена для повышения помехоустойчивости дальнемагистральной связи в ДКМ радиолинии за счет оперативного расчета МПЧ в зависимости от условий ионосферы для нестационарных расчетных моделей. При разработке и конфигурации эквалайзера предложенная расчетная модель решает задачу научно-обоснованного выбора частот, которые в данном сценарии эффективно отражаются и пропускаются ионосферой. Обоснованный выбор таких частот позволяет решить задачу достижения максимальной дальности связи в выбранном диапазоне. Конфигурационные файлы

эквалайзера, которые в свою очередь также определяются диапазоном выбранной частоты, при этом решают задачу обеспечения максимальной помехоустойчивости.

Глава 3 посвящена разработке конфигурационных файлов настройки эквалайзера с варьируемой длиной преамбулы, где учитывается соотношение размера информационного сообщения к размеру преамбулы для заданной в сеансе связи помехоустойчивости. Приводится описание результатов моделирования эквалайзера с использованием комплексной модели ДКМ радиолинии в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) и рэлеевскими замираниями. Линейный эквалайзер формирует выходной сигнал на основании входной обучающей последовательности и весовых коэффициентов w (рис. 3), которые являются дискретными значениями импульсной характеристики (ИХ) цифрового нерекурсивного фильтра. Входной дискретный сигнал $x(k)$ обрабатывается дискретным фильтром, в результате чего получается выходной сигнал $y(k)$. Этот выходной сигнал сравнивается с образцовым сигналом $d(k)$, разность между ними образует сигнал ошибки $e(k)$.

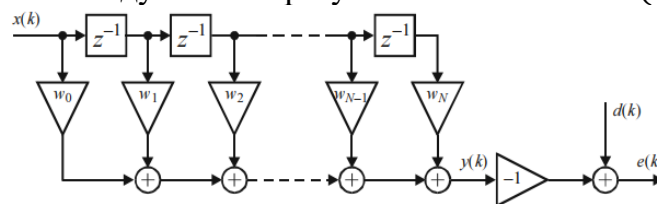


Рисунок 3 – Схема линейного эквалайзера

На практике находят применение значительно более сложные нелинейные эквалайзеры, в которых влияние сильной неравномерности частотной характеристики (ЧХ) вследствие прохождения радиоволн через ионосферный канал может быть существенно уменьшено. В настоящем исследовании для определения коэффициентов эквалайзера в декаметровом радиоканале ионосферной радиосвязи был использован наиболее эффективный рекурсивный алгоритм наименьших квадратов с обратной связью RLS DFE. Этот алгоритм позволяет минимизировать среднеквадратическую ошибку между ожидаемым выходом фильтра и фактическим выходом, что достигается путем обновления коэффициентов эквалайзера на каждой итерации. Алгоритм включает следующие операции: 1) инициализация эквалайзера: устанавливаются начальные значения коэффициентов эквалайзера, которые могут быть заданы случайным образом или инициализированы заранее; 2) подача входного сигнала: на вход эквалайзера подается сигнал, требующий коррекции и компенсации; 3) вычисление выходного сигнала: коэффициенты эквалайзера применяются к входному сигналу для получения выходного сигнала; 4) определение ошибки: вычисляется разница между ожидаемым выходом фильтра и фактическим выходом фильтра; эта разница называется ошибкой, которую необходимо минимизировать; 5) обновление коэффициентов: коэффициенты эквалайзера обновляются на каждой итерации путем умножения ошибки на входной сигнал и на некоторый множитель, известный как шаг обучения; этот процесс продолжается до тех пор, пока ошибка не будет минимизирована; 6) завершение работы: после достижения минимальной ошибки или по истечении заданного числа итераций алгоритм завершает свою работу. Данный алгоритм (рис. 4) позволяет не только минимизировать ошибки передачи, но и адаптировать систему связи ДКМ диапазона к динамичным условиям.



Рисунок 4. Блок-схема алгоритма работы адаптивного эквалайзера

Далее опишем порядок формирования конфигурационных файлов настройки эквалайзера, где учитывается соотношение размера информационного сообщения к размеру преамбулы для заданной в сеансе связи помехоустойчивости с использованием инструментов моделирования Simulink среды Matlab. Суть учета сводится к варьированию одного или нескольких параметров одновременно и последующему анализу поведения эквалайзера по критерию помехоустойчивости – зависимости коэффициента битовых ошибок BER от отношения сигнал/шум принимаемого сигнала.

Исследование эквалайзера производилось средствами имитационного моделирования в Simulink на основе цифровой системы связи стандарта MIL-STD 110D, которая включает в себя несколько ключевых компонентов: 1) сверточное кодирование со скоростью $\frac{1}{2}$; 2) блочное кодирование (31, 23); 3) перемежитель (20×20). При моделировании использовались следующие параметры эквалайзера: 1) длина линии задержки в прямом направлении (Forward Taps), которая определяет количество коэффициентов "Taps"; длинная линия задержки позволяет эквалайзеру лучше адаптироваться к изменениям канала и улучшает его характеристики; 2) длина линии задержки в обратной связи (Feedback Taps), которая влияет на количество коэффициентов при обратной связи; 3) количество отводов линии задержки (Reference Taps), которое определяет, сколько предыдущих значений сигналов будет использоваться для оценки текущего состояния канала; это позволяет эквалайзеру более точно определять необходимую корректировку; 4) коэффициент обновления взвешенной суммы значений линии задержки (Forgetting Factor), который указывает на то, как быстро эквалайзер должен забывать старую информацию о канале; чем меньше значение этого коэффициента, тем быстрее обновляются данные и, таким образом, предоставляется более быстрая реакция на изменения в канале.

В ходе исследования были выявлены научно-обоснованные конфигурационные файлы настройки эквалайзера для различных сценариев работы. Эти комбинации

параметров включают: 1) длину линии задержки; 2) коэффициенты фильтров; 3) коэффициент забывания. Для апробации конфигурационных файлов настройки эквалайзера моделирование выполнено по исходным данным в таблице 1.

Таблица 1 – Задаваемые параметры блоков модели

Sinusoidal Waveform Generator	частота 15 МГц, полоса сигнала 3 кГц, мощность 100 Вт
Free Space Path Loss	частота 15 МГц, высота передающей и принимающей антенн 10 м
Gain	усиление антенной системы
Radio Propagation Model	двухлучевая модель отражения от Земли - это модель многолучевого распространения радиосигналов, которая предсказывает потери на пути между передающей антенной и приемной антенной, когда они находятся в прямой видимости (LOS), частота 15 МГц, высота передающей и принимающей антенн 10 м, расстояние между антеннами от 100 до 10000 км

В результате имитационного моделирования разработаны и научно обоснованы конфигурационные файлы настройки эквалайзера, представленные на рис. 5.

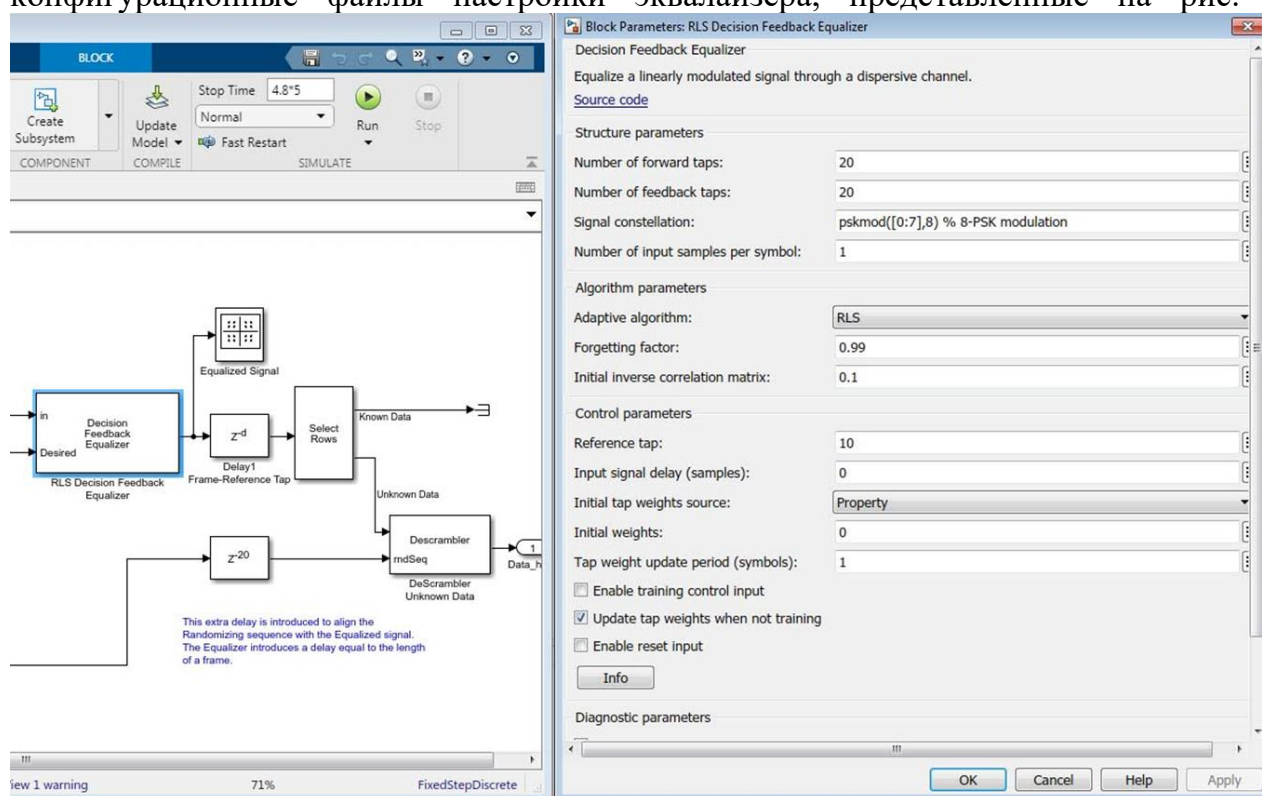


Рисунок 5 – Конфигурационные файлы настройки эквалайзера

В соответствии с MIL-STD 110D (рис. 6, а) адаптация параметров преамбулы связана с изменениями сигнально-кодовой конструкции (СКК); предусмотрено несколько информационных/пользовательских скоростей передачи, которые адаптируются под текущее состояние ионосферы. В работе представлена концепция передачи с фиксированной длиной пакета и вариативной преамбулой (рис. 6, б), которая сохраняет СКК в радиоканале. Длина пакета фиксирована, однако соотношение между длиной преамбулы и информационной частью может изменяться в зависимости от состояния ионосферы.

Кадр, передаваемый в радиоканале						
64 или 128 бит	32-128 бит	8-32 бит	...	...	16 бит	8 бит
Преамбула	Блок данных	Проба данных	Блок данных N	Проба данных N	EOM Checksum	Flash EndFlag

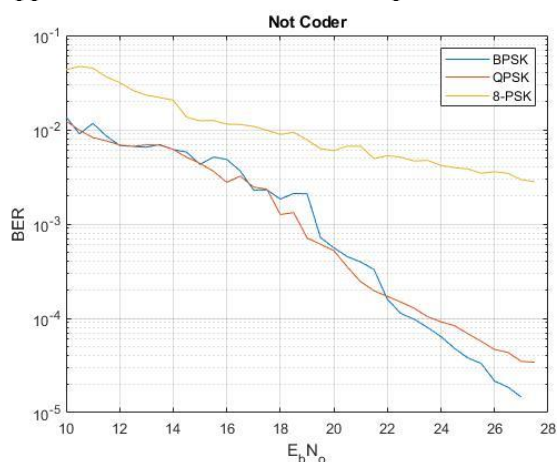
а) формат пакета с преамбулой системы связи стандарта MIL-STD 110D

Кадр, передаваемый в радиоканале		
10-100 бит	400-440 бит	400-440 бит
Вариативная преамбула	Полезная информация	Полезная информация

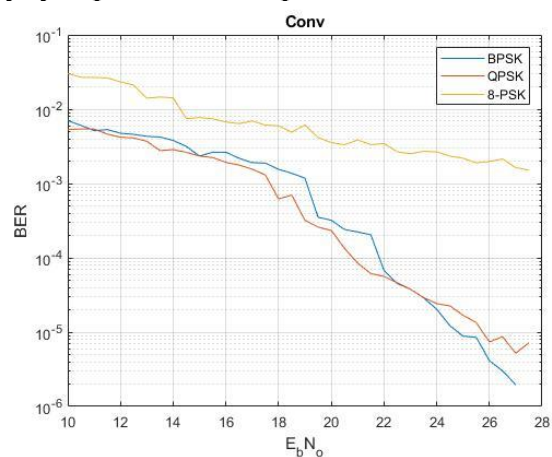
а) формат пакета с вариативной преамбулой

Рисунок 6 – Примеры сопоставленных структур пакетов

Для повышения помехоустойчивости по критерию вероятности битовой ошибки BER, рекомендуется выбирать длину преамбулы от 10 до 100 бит. При этом важно учитывать, что увеличение длины линии задержки в обратной связи может ухудшить производительность эквалайзера, что также подтверждается изучением различных построений преамбул. Применение вариативной преамбулы может значительно повысить помехоустойчивость. Моделирование радиоканала с цифровыми сигналами, содержащими преамбулу, приведено на рис. 7.



а) без кодирования



б) со сверточным кодированием

Рисунок 7 – Зависимость вероятности битовых ошибок от ОСШ

Радиоканал имеет параметры: доплеровский сдвиг 1 Гц и многолучевое распространение с разницей хода лучей от 0 до 10^{-5} с. Результаты оценки помехоустойчивости показывают зависимость BER для вариантов без кодирования (рис. 7, а) и со сверточными кодами (рис. 7, б). Анализ графиков на рис. 7 показывает снижение коэффициента BER при использовании помехоустойчивого кодирования на 7-10%. Рис. 8 демонстрирует требуемое ОСШ для сигнала с модуляцией BPSK (зеленая кривая) вне радиоканала с искажениями, для того же сигнала, прошедшего через ионосферный канал радиосвязи с доплером 1 Гц, без многолучевого распространения (красная кривая) и применение линейного эквалайзера с алгоритмом настройки по методу наименьших квадратов (LMS) – синяя кривая.

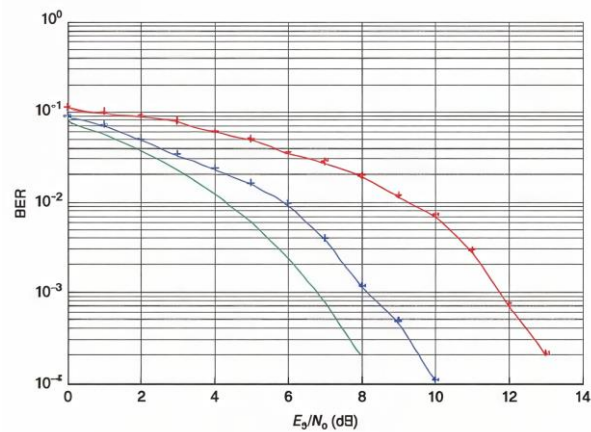


Рисунок 8 – Требуемое отношение SNR для сигнала с модуляцией BPSK

Из рис. 8 видно, что прохождение сигнала через радиоканал с искажениями ухудшает его помехоустойчивость, в среднем, на 5 дБ. Применение эквалайзера позволяет улучшить помехоустойчивость до уровня 1 дБ в сравнении с сигналом, прошедшим вне радиоканала. Таким образом, эквалайзер позволяет исправить вносимые искажения; уровень битовых ошибок 10^{-3} достигается при ОСШ = 8 дБ.

На рисунке 9 показана зависимость BER от длины преамбулы при скорости передачи 9,6 кбит/с. Длина преамбулы существенно влияет на BER, изменяясь от 10^{-1} до 10^{-5} . Для модуляции BPSK, имеющей наименьшую чувствительность к фазовым искажениям, это эквивалентно увеличению ОСШ с 10 дБ до 23 дБ, что подчеркивает важность научно-обоснованного выбора длины преамбулы для повышения помехоустойчивости. Таким образом, выигрыш от изменения длины преамбулы составляет 14 дБ без необходимости прибегать к основным методам настройки приемопередающего тракта. Тем не менее, использование модуляции QPSK может быть более выгодным, поскольку она обеспечивает в два раза большую скорость передачи данных по сравнению с BPSK при той же задержке, что позволяет достигать такой же или даже лучшей производительности при меньших значениях ОСШ.

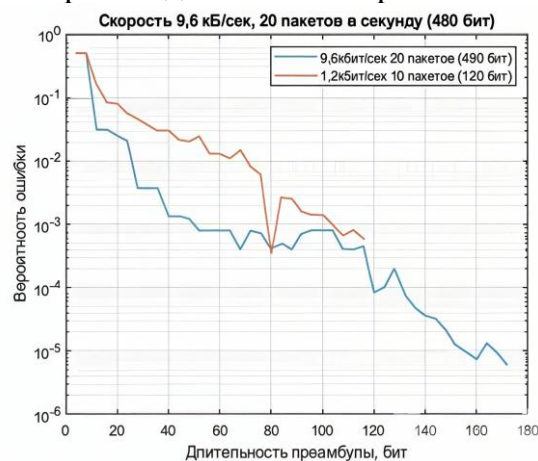


Рисунок 9 – Анализ помехоустойчивости от длины преамбулы при 9,6 кбит/с

Последующая экспериментальная апробация комплексной модели ДКМ радиолинии также учитывает предложенную в настоящей работе расчетную модель систем дальнемагистральной связи декаметрового диапазона и конфигурацию эквалайзера с различными длинами преамбул. Полученные средствами имитационного моделирования параметры на входе приемника учитывают модель ДКМ радиолинии и определяют вариативный (в зависимости от ОСШ) порядок выбора длины преамбулы. Экспериментальная апробация выбранных длин преамбул в функционирующей

системе ДКМ радиолинии для заданного сценария подтверждает практическую применимость предложенного подхода.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальной апробации комплексной радиолинии дальнемагистральной связи ДКМ диапазона и приемного эквалайзера с конфигурационными файлами настройки с варьируемой преамбулой показали возможность работы при отношении сигнал/шум от 14 дБ с вероятностью ошибки не более 10^{-3} . Для проведения эксперимента в четвертой главе было дополнительно проведено имитационное моделирование работы цифровой системы связи с использованием эквалайзера с заданными параметрами для модуляции BPSK с целью установления максимально необходимой длины преамбулы в эксперименте, где разница хода лучей в рэлеевском двухлучевом радиоканале выбрана равной 5×10^{-4} с. На рис. 10 представлен спектр сформированного сигнала с преамбулой длиной 50 бит.

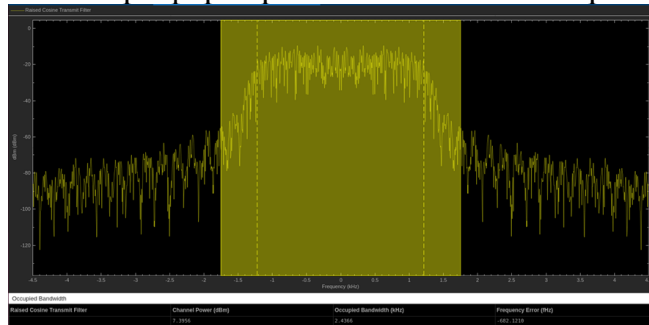


Рисунок 10 – Спектр сформированного сигнала BPSK

Результаты моделирования оценки помехоустойчивости представлены на рис. 11 в форме зависимости BER от ОСШ при длинах преамбулы от 10 до 100 бит.

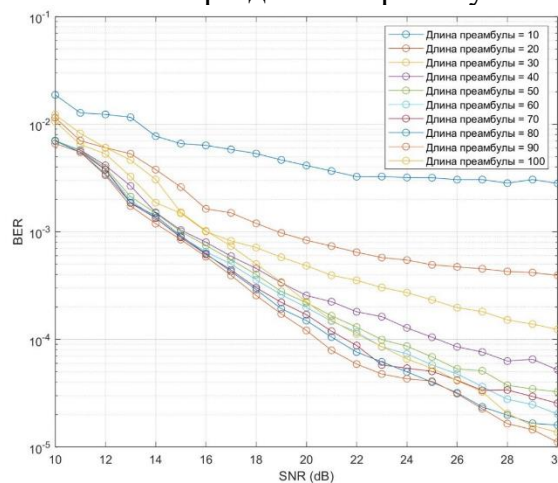


Рисунок 11 – Зависимость BER от ОСШ для длины преамбулы от 10 до 100 бит

Анализ результатов моделирования позволил сделать следующие выводы: 1) при длине преамбулы 40 символов (в пакете 800 бит) достигим $BER \approx 10^{-3}$ (далее приемлемый BER) при ОСШ = 20 дБ; 2) для преамбулы 100 символов также достигается приемлемый BER при ОСШ = 20 дБ; 3) увеличение длины преамбулы свыше 100 бит не значительно улучшает помехоустойчивость, указывая на то, что это эмпирически установленный верхний предел; 4) без эквалайзера уровень $BER \approx 0,5$, что свидетельствует об ухудшении качества передачи в ионосферном канале.

Выполнив моделирование и установив максимально необходимую длину преамбулы, опишем далее натурный эксперимент, который состоялся 28 ноября 2023 года между двумя стационарными позициями в Санкт-Петербурге и Иркутске на расстоянии 4450 км. Ионосферное распространение радиоволн с двумя точками

отражения предоставляет уникальную возможность анализировать реальные условия передачи сигналов на больших расстояниях. В таблице 2 приведены уровни мощностей, зафиксированные при проведении эксперимента.

Таблица 2 – Уровни мощностей при проведении эксперимента

Серия (мощность)	Номер серии							
	1	2	3	4	5	6	7	8
5 Вт	23	13	13	12	13	12	13	23
10 Вт	28	16	18	18	18	17	18	27
Время приёма (МСК)	09:16	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00

Время восхода: 09 часов 28 минут. Время заката: 16 часов 04 минут.

На рис. 12 представлено рассчитанное отображение точек отражения радиоволны от ионосферы и поверхности земли, взятый из расчетной модели при подготовке к началу сеанса связи, что позволяет визуализировать путь, по которому проходит сигнал; синим показаны точки отражения от ионосферы, красным показаны точки отражения от поверхности Земли.

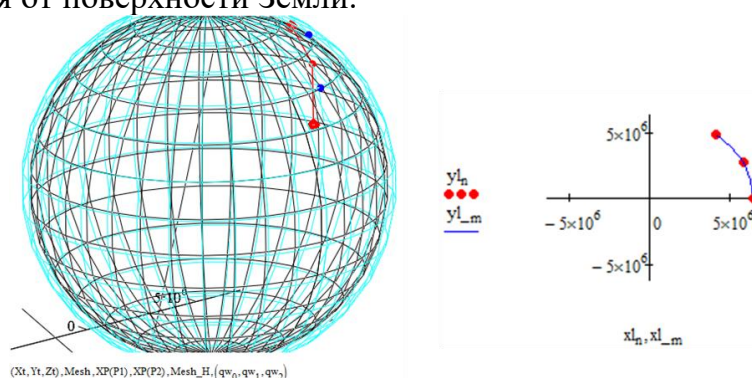


Рисунок 12 – Отображение точек отражения радиоволны на пути распространения

Для проведения трассовых испытаний в рамках исследования повышения помехоустойчивости цифровой системы радиосвязи был использован следующий комплект оборудования: 1) многофункциональный трансивер Icom IC-7300; 2) антенна магнитная для работы в диапазоне декаметровых волн SpiderLoop A100; 3) прочее вспомогательное оборудование: источники питания и фидерные линии с сопротивлением 50 Ом и др. На рис. 13 представлен стенд трассовых испытаний в г. Санкт-Петербурге; аналогичный стенд работал одновременно в г. Иркутск.



Рисунок 13 – Оборудование корреспондентов радиолинии

Для проведения эксперимента по исследованию помехоустойчивости цифровой системы радиосвязи был выбран сигнал с 4-позиционной фазовой манипуляцией

(QPSK) со следующими параметрами: тип модуляции; скорость передачи данных 800 бит/с; длительность сигнала 5 секунд; частота дискретизации: 8000 Гц.

С помощью функции «pskmod» в среде Simulink был сформирован сигнал QPSK. В результате был получен вектор данных, содержащий 40000 отсчетов. Полученный вектор был вставлен в заранее созданный файл формата WAV, который подавался на трансивер Icom IC-7300. Прием сигнала на стороне получателя осуществлялся с использованием встроенных средств трансивера Icom IC-7300. Основные параметры для записи принятого сигнала это использование цифрового полосового фильтра 0,3 – 3,1 кГц. Этот диапазон соответствует частотам, необходимым для обработки QPSK сигналов, минимизируя влияние шумов и помех из других диапазонов.

Запись радиоэфира начиналась по предварительной договоренности между абонентами испытываемого радиоканала и останавливалась сразу после окончания передачи сигнала, который обнаруживался «на слух». Эксперимент проводился с целью установления конфигурационных файлов настройки эквалайзера, позволяющих добиться наилучшей в данных условиях помехоустойчивости. Для обнаружения сигнала в заранее записанном файле использовалась функция «Xcorr», которая вычисляет взаимную корреляцию между двумя векторами и позволяет определить степень схожести между переданным и принятым сигналами; при этом формат переданного сигнала известен на приемной стороне.

В процессе записи радиоэфира была учтена особенность того, что запись начиналась заранее, до появления QPSK сигнала. Это привело к тому, что около половины длительности принятого сигнала содержит собственный шум приемника. После успешного обнаружения сигнала был выполнен процесс наложения спектров переданного и принятого сигналов для их однозначной идентификации (рис. 14).

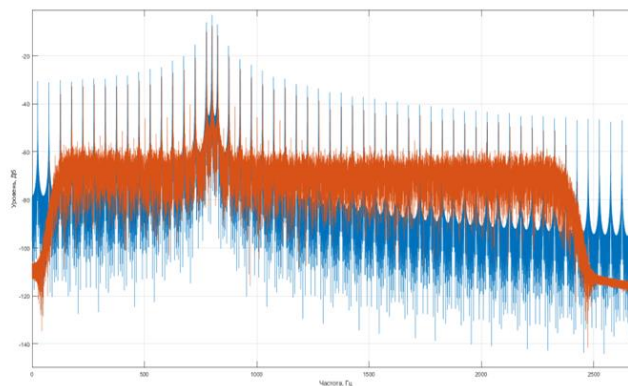


Рисунок 14 – Спектры переданного (синий) и принятого (оранжевый) сигналов

Из рис. 14 видно совпадение спектров переданного и принятого сигналов, что свидетельствует о корректной идентификации переданного сигнала на приеме.

Для настройки эквалайзера использована часть принятого сигнала, определенная как преамбула. Длина преамбулы влияет на способность эквалайзера адаптироваться к изменяющимся условиям сигнала следующим образом: 1) краткая преамбула требует меньше времени на адаптацию, но может привести к повышению BER; 2) преамбула увеличенной длины дает эквалайзеру больше времени для адаптации, что может улучшить качество приема и снизить уровень ошибок, однако это также приводит к задержкам и уменьшению пропускной способности канала.

При подстройке эквалайзера на работу радиоканала с настройками для передачи сигнала с QPSK параметры Forward Taps играют ключевую роль в компенсации фазовых искажений, вызванных радиоканалом. Они определяют количество задержек

сигнала в прямом направлении, тем самым это позволяет добиться лучшего качества восстановления сигнала. Увеличение числа отводов в Forward Taps может улучшить способность эквалайзера к компенсации различных эффектов, таких как межсимвольные интерференции и фазовые искажения. Feedback Taps, в отличие от Forward Taps, более акцентированы на улучшении качества восстановления сигнала за счет учета ранее полученной информации о выходе эквалайзера. В таблице 3 продемонстрированы результаты полученных значений BER при различных длинах Forward Taps, научно обоснованные в результате эксперимента. Из анализа таблицы 3 был установлен оптимальный набор параметров, которые обеспечивают наименьшее значение BER для различных длин преамбулы: 1) значение Forward Taps = 10 показало наименьшее BER для всех длин преамбулы; 2) увеличение значения Feedback Taps на 11 и более приводит к недостаточной эффективности эквалайзера, так как на значениях 12 и выше восстанавливаемый сигнал становится некорректным, а декодирование невозможно; 3) значения Reference Taps = 10 использует фиксированное количество отводов, что обеспечивает необходимую эффективность эквалайзера.

Таблица 3 – Полученные значения BER при различных длинах Forward Taps

Forward Taps	BER (100 bits)	BER (70 bits)	BER (50 bits)
10	1.78×10^{-3}	1.83×10^{-3}	3.41×10^{-3}
11	3.86×10^{-3}	1.94×10^{-3}	3.51×10^{-3}
12	2.29×10^{-3}	2.06×10^{-3}	3.42×10^{-3}
13	2.44×10^{-3}	2.32×10^{-3}	4.43×10^{-3}
14	2.36×10^{-3}	2.27×10^{-3}	4.28×10^{-3}
15	2.47×10^{-3}	2.33×10^{-3}	4.63×10^{-3}
16	2.52×10^{-3}	2.59×10^{-3}	4.78×10^{-3}
17	2.84×10^{-3}	3.31×10^{-3}	4.83×10^{-3}
18	2.87×10^{-3}	3.28×10^{-3}	5.81×10^{-3}
19	2.95×10^{-3}	3.12×10^{-3}	5.59×10^{-3}
20	2.87×10^{-3}	3.02×10^{-3}	5.67×10^{-3}
21	3.15×10^{-3}	3.07×10^{-3}	5.91×10^{-3}
22	2.98×10^{-3}	3.21×10^{-3}	5.81×10^{-3}
23	3.38×10^{-3}	3.57×10^{-3}	6.06×10^{-3}
24	3.48×10^{-3}	3.89×10^{-3}	6.05×10^{-3}
25	3.38×10^{-3}	3.66×10^{-3}	6.54×10^{-3}
26	3.08×10^{-3}	4.18×10^{-3}	6.71×10^{-3}
27	3.23×10^{-3}	4.16×10^{-3}	6.83×10^{-3}

Основной вывод по результатам проведенного эксперимента заключается в том, что в условиях ионосферного канала протяженностью 4450 км использование эквалайзера с предложенными конфигурационными файлами настройки позволило снизить BER с 0,5 до 10^{-3} при длине преамбулы от 40 до 100 бит.

По выбору длин преамбулы и их влиянию на уровень BER можно сформулировать следующие выводы: 1) использование преамбулы длиной от 10 бит приводит к BER, превышающему 10^{-3} , что не удовлетворяет минимальным требованиям помехоустойчивости; 2) при длине преамбулы 20 бит наблюдается улучшение помехоустойчивости, однако уровень ослабления сигнала (ОСШ на уровне

19 дБ) является недостаточным для дальнейшего качественного приема; 3) в диапазоне длин преамбулы от 50 до 100 бит BER достигает 10^{-3} при ОСШ от 14 до 15 дБ, что демонстрирует повышение помехоустойчивости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие научные результаты.

1. Разработанная расчетная модель радиотрассы системы дальнемагистральной связи ДКМ диапазона в отличие от известных моделей учитывает комплекс параметров, включающий задаваемое для данного сеанса связи отношение сигнал/шум в ДКМ радиолинии, пересчитанные значения критических частот по прогнозам концентрации электронов, полученных из радиопрогнозов IRI, а также доплеровский сдвиг для каждого слоя ионосферы.

2. Разработанные конфигурационные файлы настройки эквалайзера впервые учитывают соотношение размера информационного сообщения к размеру преамбулы для заданной в сеансе связи помехоустойчивости и имеют самостоятельную теоретическую значимость в части обоснования варьирования длины преамбулы, как средства настройки эквалайзера. Практическая значимость разработанных конфигурационных файлов настройки с варьируемой длиной преамбулы заключается в научно обоснованном повышении помехоустойчивости систем дальнемагистральной связи ДКМ диапазона на 4 дБ по сравнению со случаем без использования конфигурации с максимальной длиной преамбулы.

3. Экспериментальная апробация комплексной модели ДКМ радиолинии и приемного эквалайзера с конфигурационными файлами настройки и варьируемой длиной преамбулы впервые показала возможность работы при отношении сигнал-шум от 14 дБ с вероятностью ошибки не более 10^{-3} без предварительного зондирования ионосферы.

Совокупность полученных результатов позволяет говорить о решении комплексной научной задачи разработки, реализации и экспериментальной апробации приемного эквалайзера с конфигурационными файлами настройки и варьируемой длиной преамбулы в заданном сценарии помехоустойчивости для сеансов связи продолжительностью несколько часов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Рыбаков А.И. Разработка и исследование конфигурации эквалайзера для повышения помехоустойчивости в декаметровых радиоприемах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – №4. – С. 212-227.
2. Рыбаков А.И. Постановка задачи повышения помехоустойчивости систем дальнемагистральной связи декаметрового диапазона / А.И. Рыбаков, Г.А. Фокин // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11. – № 2. – С. 56-66.
3. Рыбаков А.И. Рекомендации по повышению эффективности канала дальней КВ-радиосвязи на радиотрассу Санкт-Петербург - Иркутск / А.И. Рыбаков // Экономика и качество систем связи. – 2024. – № 4(34). – С. 81-92.
4. Рыбаков А.И. Адаптация информационно-технических характеристик к постоянно изменяющимся параметрам ионосферного распространения / Р.Е. Кротов, С.А. Кокин, А.И. Рыбаков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – №2(212). – С. 209-218.
5. Рыбаков А.И. Выбор и использование программной архитектуры действующего протокола передачи данных программно-конфигурируемого радиоканала / А.И. Рыбаков, О.В. Воробьев // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2019. – Т. 22. – №4. – С. 18-30.
6. Рыбаков А.И. Методика расчета уровня сигнала КВ-передатчика в точке приёма / Р.Е. Кротов, А.И. Рыбаков // Информатизация и связь. – 2019. – №2. – С. 97-102.
7. Рыбаков А.И. Вариант реализации действующего протокола передачи данных для разрабатываемой архитектуры радиопередающей системы, для автоматизированного комплекса связи / А.И. Рыбаков // Известия ЮФУ. Технические науки – 2019. – №4. – С. 126-140.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы цитирования

8. Rybakov, A. Improving the efficiency of adaptive operation of the decameter communication line / A. Rybakov, G. Fokin // 2025 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications, Moscow. – 2025. – pp. 1-5.
9. Rybakov, A. Development of the mobile information system with the use of meteoral communication channels / Rybakov A.I. // В сборнике: 2018 Systems of Signal Synchronization Generating and Processing in Telecommunications. SYNCHROINFO 2018. – Minsk, 2018. – pp. 546 – 549.
10. Rybakov, A. Technology for creation and use predictional status forecasting systems on ships with multi-criteria information processing algorithms / Kachnov A.V., Rybakov A.I. // В сборнике: 2018 Systems of Signal Synchronization Generating and Processing in Telecommunications. SYNCHROINFO 2018. – Minsk, 2018. – pp. 309-314.

В других изданиях и сборниках научных трудов и конференций

11. Рыбаков А.И. Постановка задачи повышения помехоустойчивости современных систем декаметровой радиосвязи / А.И. Рыбаков // В сборнике: Научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов НТК ППС. Сборник научных трудов 65-ой Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. – 2025. – С. 348-353.
12. Рыбаков А.И. Увеличение помехоустойчивости декаметрового радиоканала в системах дальнемагистральной радиосвязи/ А.И. Рыбаков // В сборнике: Сборник научных трудов 80-ой Научно-технической конференции СПб НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященной Дню радио 2025. – 2025. – С.164-167.
13. Рыбаков А.И. Повышение эффективности адаптивной работы декаметровой линии связи / А.И. Рыбаков // В сборнике лучших докладов конференции: Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации (ПКМ-2024). Сборник лучших докладов V Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей. В 2-х томах. Санкт-Петербург, 2025. – С. 96-102.
14. Рыбаков А.И. Рекомендации по повышению помехоустойчивости канала дальней КВ радиосвязи СПб – Иркутск / В.Е. Коротин, Р.Е. Кротов, А.И. Рыбаков // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. Санкт-Петербург, 2024. – С. 281-285.

15. Рыбаков А.И. Моделирование двунаправленной структуры адаптивного эквалайзера на основе алгоритма Калмана / О.В. Воробьев, Р.Е. Кротов, А.И. Рыбаков // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО-2023). Сборник научных трудов XII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. – 2023. – С. 147-151.
16. Рыбаков А.И. Моделирование итеративного эквалайзера с двунаправленной структурой / Р.Е. Кротов, А.И. Рыбаков // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО-2023). Сборник научных трудов XII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. – 2023. – С. 366-371.
17. Рыбаков А.И. Помехоустойчивая сигнально-кодовая конструкция на базе частотной манипуляции в ионосферном канале радиосвязи / А.И. Рыбаков // Экономика и качество систем связи. – 2023. – №1(27). – С. 29-34.
18. Рыбаков А.И. Периодическая последовательность с идеальными автокорреляционными свойствами / В.Е. Коротин, Р.Е. Кротов, А.И. Рыбаков // Сборник материалов и тезисов международной конференции: Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом. – 2022. – С. 14-17.
19. Рыбаков А.И. Исследование и анализ основных качественных характеристик модели радиоканала с вариативной преамбулой / Р.Е. Кротов, А.И. Рыбаков // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО-2022). Сборник научных трудов XI Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. – 2022. – С. 245-249.
20. Рыбаков А.И. Повышение помехоустойчивости в коротковолновом радиоканале при помощи CRC и LDPC кодов / Р.Е. Кротов, А.И. Рыбаков // Экономика и качество систем связи. – 2021. – №2(20). – С. 47-52.
21. Рыбаков А.И. Выбор наилучшего парциального канала передачи информации для распространения циркулярных данных и ретрансляции данных между абонентами / Р.Е. Кротов, С.А. Кокин, А.И. Рыбаков // В книге: Мобильный бизнес: Перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и зарубежом. – 2020. – С. 7-9.
22. Рыбаков А.И. Выбор наилучшего парциального канала дальней КВ радиосвязи / Р.Е. Кротов, С.А. Кокин, А.И. Рыбаков // Экономика и качество систем связи. – 2020. – №2(16). – С. 72-78.
23. Рыбаков А.И. Формирование самоорганизующихся сетей для распространения циркулярных данных и ретрансляции данных между абонентами // В книге: Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом. Сборник материалов (тезисов) XIII международной конференции РАЕН. – 2019. – С. 8-10.
24. Рыбаков А.И. Формирование мобильной системы информационного обеспечения с использованием программно-конфигурируемого радиоканала для распространения циркулярных данных и ретрансляции данных между абонентами / А.И. Рыбаков, О.В. Воробьев // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО-2019). Сборник научных трудов VIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах. – 2019. – С. 89-94.
25. Рыбаков А.И. Моделирование основных характеристик и параметров функциональных блоков и системы в целом при выборе оптимальных частотных каналов связи / А.И. Рыбаков // Экономика и качество систем связи. – 2019. – №1(1). – С. 13-18.
26. Рыбаков А.И. Алгоритм декодирования действующего протокола передачи данных программно-конфигурируемого радиоканала // Экономика и качество систем связи. – 2019. – №3(13). – С. 46-50.
27. Рыбаков А.И. Вариант реализации действующего протокола передачи данных для программно-конфигурируемого радиоканала // В сборнике: Технологии информационного общества. Материалы XII Международной отраслевой научно-технической конференции – 2018. – С. 195-197.
28. Рыбаков А.И. Вариант реализации схемы кодирования и действующего протокола передачи данных программно-конфигурируемого радиоканала, с применением метеорной связи // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018). Сборник научных статей: в 4 томах. Под редакцией С.В. Бачевского, составители: А.Г. Владыко, Е.А. Аникевич. – 2018. – С. 269-274.
29. Рыбаков А.И. Разработка мобильной системы информационного обеспечения с использованием каналов метеорной связи / А.И. Рыбаков // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2018. – Т.9. – №3. – С. 142-145.

30. Рыбаков А.И. Мобильная система информационного обеспечения с использованием программно-конфигурируемого канала связи и канала МС / А.И. Рыбаков // Экономика и качество систем связи. – 2018. – №3(9). – С. 3-8.
31. Рыбаков А.И. Вариант реализации двунаправленной связи в системе метеорной связи. Описание программно-аппаратного комплекса / А.И. Рыбаков, О.В. Воробьев // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сборник научных статей: в 4 томах. – 2017. – С. 128-133.
32. Рыбаков А.И. Архитектура радиопередающей системы в составе автоматизированного корабельного комплекса связи / А.И. Рыбаков, О.В. Воробьев // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. Материалы научного форума с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – 2015. – С. 43-45.