

А.И. Рыбаков

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЭКВАЛАЙЗЕРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ В ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОЛИНИЯХ

Проблема повышения помехоустойчивости декаметровых радиолиний (ДКМ) в современных отечественных системах радиосвязи, включая коротковолновую (КВ) связь, остается значимой и востребованной, несмотря на наличие многочисленных классических исследований. В качестве объекта нашего анализа выбраны именно системы ДКМ радиосвязи. Конкретно, система Р-016, используемая в качестве прототипа, сталкивается с такими ограничениями, как диапазон частот, что сказывается на ее эффективности в условиях изменчивости ионосферных характеристик, негативно влияющих на уровень сигналов. Проблемы обработки сигналов в прототипах могут привести к возникновению битовых ошибок, достигающих уровня ошибок (BER) в 10^{-3} , даже при отсутствии значительных помех. Основная задача исследования заключается в оценке влияния различных факторов, таких как изменение длины преамбулы и внедрение адаптивных фильтров, на помехоустойчивость систем. Анализ результатов указывает на то, что увеличение длины преамбулы способствует улучшению помехоустойчивости декаметровых радиолиний. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности повышения помехоустойчивости существующих систем ДКМ радиосвязи, функционирующих в условиях варьирующихся ионосферных характеристик. В данной работе также рассматривается научно обоснованный выбор конфигурации эквалайзера для декаметровых радиолиний с целью увеличения дальности связи и улучшения помехоустойчивости. Разработанные методы обеспечивают научное обоснование эффективных настроек эквалайзера, что позволяет достигать максимальных показателей дальности. Для проверки различных конфигураций эквалайзера в условиях рэлеевского канала используется имитационное моделирование в среде Simulink, что подтверждает правильность выбранных параметров. Экспериментальная апробация модели ДКМ радиолинии включает исследование различных длин преамбул, а анализ отношений сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника позволяет адаптировать эти параметры. Таким образом, результаты исследования показывают, что увеличение длины преамбулы положительно сказывается на помехоустойчивости системы. Работа сосредоточена на моделировании и методах функционирования радиолиний ДКМ, а полученные результаты имеют практическое значение для активной адаптации существующих радиосистем в условиях изменяющейся ионосферы.

Дальнемагистральная система связи; отношение сигнал/шум; помехоустойчивость радиоканала; декаметровая радиосвязь; эквалайзер; преамбула; адаптивные фильтры.

A.I. Rybakov

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE EQUALIZER CONFIGURATION TO INCREASE NOISE IMMUNITY IN DECAMETER RADIO LINES

The problem of increasing the noise immunity of decameter radio lines (DRL) in modern domestic radio communication systems, including short-wave (SW) communication, remains significant and in demand, despite the existence of numerous classical studies. The decameter radio communication systems have been chosen as the object of our analysis. Specifically, the R-016 system, which is used as a prototype, faces limitations such as its frequency range, which affects its effectiveness in conditions of variable ionospheric characteristics that negatively impact the signal level. Signal processing issues in prototypes can lead to bit errors reaching a bit error rate (BER) of 10^{-3} , even in the absence of significant interference. The main objective of the study is to evaluate the impact of various factors, such as changing the length of the preamble and implementing adaptive filters, on the noise immunity of systems. The analysis of the results indicates that increasing the length of the preamble improves the noise immunity of decameter radio lines. The practical significance of the results is that they can be used to improve the noise immunity of existing DFM radio communication systems that operate in variable ionospheric conditions. This paper also discusses the scientific basis for selecting an equalizer configuration for decameter radio lines to increase communication range and improve noise immunity. The developed methods provide a scientific basis for selecting effective equalizer settings, which can lead to improved communication range. To test different equalizer configurations in a Rayleigh channel, Simulink simulation is used, which

confirms the correctness of the selected parameters. Experimental validation of the decameter radio line model includes the study of various preamble lengths, and the analysis of signal-to-noise ratios (SNR) at the receiver input allows for the adaptation of these parameters. Thus, the research results show that increasing the preamble length has a positive impact on the system's noise immunity. The work focuses on the modeling and operation of DFM radio lines, and the obtained results have practical significance for the active adaptation of existing radio systems in a changing ionosphere.

Long-range communication system; signal-to-noise ratio; radio channel noise immunity; decameter radio communication; equalizer; perambulatory; adaptive filters.

Введение. Современные декаметровые линии радиосвязи сталкиваются с несколькими техническими недостатками, которые требуют комплексного подхода для адаптации параметров в зависимости от конкретных условий. Одной из основных проблем является непостоянство состояния ионосферы, что приводит к значительным колебаниям характеристик в диапазоне частот от 10 до 100 МГц. Это также усложняет точное прогнозирование этих характеристик на временной интервал, соответствующий предстоящему сеансу радиосвязи, который может длиться от нескольких часов до суток [1, 2]. Для решения этих проблем была разработана расчетная модель, которая позволяет определить мощность сигнала на входе приемника, основываясь на параметрах передающего и приемного оборудования, а также задаваемых характеристиках скоростной передачи, полосы частот и требуемого уровня ошибок (ОШ) передачи. Модель также помогает установить временной интервал, в течение которого возможно вести сеансы связи, а также тестировать применяемые адаптационные методы. Результаты расчетов показали, что необходимая мощность передатчика для достижения уровня BER не хуже 3×10^{-3} составляет примерно 10 Вт. Это значение обусловлено несколькими факторами. Во-первых, уровень BER в 3×10^{-3} считается допустимым для ряда радиокommunikационных приложений, что позволяет достичь баланса между качеством передачи и мощностью передатчика в разрабатываемой модели. Во-вторых, мощность 10 Вт выбрана на основе анализа параметров ионосферного канала, включая шумы и затухания сигналов. Эта мощность обеспечивает наилучшие условия помехоустойчивости в заданных условиях. Возможно снижение мощности до 5 Вт, однако это приведет к уменьшению уровня принимаемого сигнала на входе демодулятора на 3 дБ.

Описание или постановка решаемой задачи. В условиях крайне высокой ионизации атмосферы декаметровые линии могут столкнуться с подобными трудностями, как и другие радиотехнические системы, однако они адаптируются и восстанавливаются значительно быстрее [3]. Тем не менее, надёжность таких линий может быть недостаточной из-за эффектов замирания сигнала при ионосферном распространении и наличия "молчащих зон", что может привести к значительным потерям информации, особенно если команды для крупной региональной системы передаются исключительно по декаметровым радиолиниям. В то же время, радиосвязь в ДКМ диапазоне, наряду со спутниковой связью, остаётся одним из средств межконтинентальной связи, предлагая экономичное решение для организации дальнего радиосвязи [4]. В отличие от этого, системы связи в микроволновых диапазонах эффективны только при одновременной передаче сотен и даже тысяч телефонных каналов.

В рамках модели рассчитываются точки отражения как от ионосферы, так и от поверхности Земли. После определения точек отражения происходит импорт данных с прогнозами (статистические данные модели IRI - International Reference Ionosphere) или фактических данных с ионозонда о критических частотах. Из-за физической специфики распространения радиоволн ионизация ионосферных слоев происходит неоднородно под воздействием солнечной активности. В результате точки отражения для протяженных радиотрасс могут находиться в разных частях планеты, что объясняет максимальное количество возможных скачков – до шести, поскольку при этом радиоволна может полностью обойти планету.

В рамках исследуемой дальнемагистральной системы связи на уровень битовых ошибок одновременно влияют два ключевых фактора: соотношение сигнал/шум и степень фазовых искажений, возникающая из-за доплеровского сдвига, вызванного случайным движением неоднородностей ионосферы [5]. Это приводит к тому, что даже при

высоком уровне сигнала на входе демодулятора могут возникать затруднения с приёмом из-за фазовых искажений, что в конечном итоге негативно сказывается на качестве связи [6]. Предметом исследования выступают модели и методы функционирования радиолиний ДКМ радиосвязи, что позволяет оценить влияния различных факторов, таких как изменение длины преамбулы и использование адаптивных фильтров, на помехоустойчивость системы.

Для повышения помехоустойчивости декаметрового радиоканала в системах дальнемагистральной связи, в данном исследовании формулируются следующие задачи:

1. Экспериментальная апробация комплексной модели ДКМ радиолинии, которая включает в себя расчетную модель радиотрассы и полевые измерения профиля ДКМ радиолинии. Эта апробация позволит научно обосновать выбор параметров передачи на основе отношения сигнал / шум (ОСШ) с учетом различных длин преамбул.

2. Создание эквалайзера и настройка его конфигурационных файлов для обеспечения надежной доставки данных во время сеанса радиосвязи с заданным качеством и минимальными потерями информации. Программная реализация данного эквалайзера будет выполнена через имитационное моделирование в программной среде Simulink, с учетом характеристик рэлеевского канала.

Основной научной задачей исследования является разработка, программная реализация и экспериментальная проверка эквалайзера с конфигурационными файлами настройки, учитывающего как расчетную модель радиотрассы, так и полевые измерения профиля ДКМ радиолинии [7]. Материал настоящего исследования организован далее следующим образом. Раздел 2 посвящен разработке эквалайзера и конфигурационных файлов его настройки для обеспечения доставки данных за сеанс радиосвязи представлена в разделе 4. Результаты экспериментальной апробации комплексной модели ДКМ радиолинии описаны в разделе 5. Выводы и направления дальнейших исследований приводятся в заключении.

3. Методика исследования. Анализ применяемых сигнально-кодовых конструкций (СКК). Формирование СКК основывается на операциях преобразования информационной последовательности в кодовую посредством внесения избыточности, а также преобразования кодовой последовательности в канальную с использованием манипуляционного кода. Одной из ключевых операций в этом процессе является помехоустойчивое кодирование, которое увеличивает энергетическую эффективность системы связи. Энергетический выигрыш, получаемый от кодирования, зависит от степени увеличения минимального сигнального расстояния между разрешенными кодовыми блоками [8].

Основные признаки классификации СКК включают:

- ◆ типы помехоустойчивого кода;
- ◆ типы ансамблей сигналов;
- ◆ способы согласования модуляции и кодирования.

На выбор параметров СКК также оказывают влияние два ключевых фактора, обусловленных искажением сигнала в результате прохождения электромагнитной волны через ионосферу:

- ◆ отношение сигнал/шум на входе демодулятора;
- ◆ величина фазового искажения.

На рис. 1 [9] приведены минимальные требуемые отношения сигнал/шум (ОСШ) для различных уровней битовых ошибок, что иллюстрирует влияние этих факторов на параметры СКК.

На рис. 2 [9] ниже представлена зависимость битовых ошибок от величины фазового искажения.

В применяемой одночастотной сигнально-кодовой конструкции СКК используется два вида модуляции – QPSK (Offset Quadrature Shift Keying) и BPSK (Quadrature Shift Keying). Мотивацией к выбору данных методов послужила необходимость применения в системе четырехпозиционной манипуляции (QPSK) для достижения необходимых значений спектральной и энергетической эффективности [10]. Относительно высокое значение пик-фактора сигнала QPSK (до 3.6 дБ) не позволяет эффективно использовать усилители мощности передающих устройств.

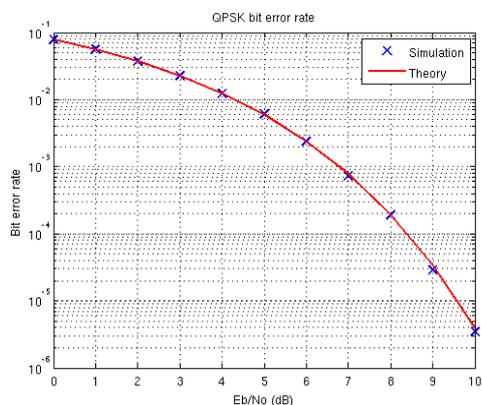


Рис. 1. Минимальные требуемые ОСШ для разных уровней битовых ошибок

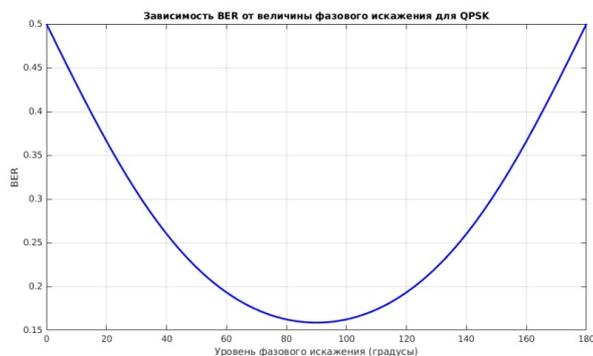


Рис. 2. Зависимость битовых ошибок от величины фазового искажения

BPSK и QPSK демодуляторы имеют разное допустимое окно фазовой ошибки и, при повышении фазовых ошибок в радиоканале, необходимо будет произвести оператору смену модуляции QPSK на BPSK, тем самым допуская двукратное снижение технической, как следствие – пользовательской, скорости передачи данных. Теоретический смысл разработанной модели и показанной зависимости на рис. 4 в подборе граничных значений уровня фазовых искажений принимаемого сигнала, при учете которого, за счет использования вариации длины преамбулы в модуляции QPSK [11], не нужно будет переключаться на модуляцию BPSK, как следствие, обеспечив большую скорость передачи информационных данных, чем в BPSK.

В предлагаемом методе повышения помехоустойчивости декаметрового радиоканала допускается следующее, что при использовании фиксированной длины пакета данных операция по увеличению длины преамбулы снизит количество пользовательской информации в пакете, тем самым приведя к снижению скорости передачи пользовательских данных.

Чтобы проверить предложенный метод на практике была использована модель в пакете программ Simulink, сконфигурированная под иммитатор действующего дальнемагистрального ДКМ радиоканала. Следует также заметить, что использование среды Matlab Simulink не ограничивается только вопросами моделирования. Развитые средства Matlab Simulink благодаря поддержке со стороны ведущих производителей программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [13] и цифровых процессоров обработки сигналов (ЦПОС) позволяют во многих случаях многократно ускорить разработку программного обеспечения (ПО) путём автоматического создания кода на языках описания аппаратуры (HDL-языки) и языке программирования C/C++, благодаря наличию пакета Real-Time Workshop, можно генерировать код на языке C/C++ без привязки к конкретному оборудованию.

Результаты моделирования распространения радиоволн в ДКМ радиоканале показали, что используемые в моделях программные эквалайзеры являются эффективным средством для улучшения помехоустойчивости. Снижение требуемого ОСШ для заданного уровня битовых ошибок (BER) подтверждает значимость данной технологии в контексте обеспечения качественной связи. Рекомендации по применению методик и моделей в вопросе повышения помехоустойчивости, которые формируются, должны включать в себя алгоритмы, адаптированные для обработки данных с учетом специфики ионосферного распространения радиосигналов. Это может включать использование методов машинного обучения для прогнозирования характеристик ЭМП на основе исторических данных, а также разработку имитационных моделей, которые упростят анализ различных условий распространения [13].

4. Разработка архитектуры и алгоритма работы радиоканала, с учетом специфики ионосферного распространения радиосигналов, адаптированный для обработки данных программный эквалайзер. Эквалайзер представляет собой цифровой настраиваемый фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ), который используется для коррекции различных искажений сигналов, возникающих в процессе передачи и приема. Основной задачей эквалайзера является компенсация фазовых искажений принимаемого радиосигнала, что позволяет улучшить качество воспроизводимого сигнала.

Структура эквалайзера может быть как линейной, так и нелинейной. Линейный эквалайзер представляет собой КИХ-фильтр с функцией задержки, который хранит отсчеты принятого сигнала. В процессе работы системы эквалайзер сохраняет данные, поступающие с каждым новым тактом, и на выходе формирует взвешенную сумму значений, обновляя их для следующего такта [13, 14]. Линейные эквалайзеры могут эффективно снижать межсимвольную интерференцию (лат. ISI). Если импульсная характеристика канала равна нулю, эквалайзер может начать усиливать шум, что снижает качество сигнала.

В этом контексте выделяют несколько популярных методов адаптивной фильтрации, таких как RLS (Recursive Least Squares), LMA (Levenberg-Marquardt Algorithm) и CMA (Constant Modulus Algorithm) [15]. CMA может эффективно выполнять коррекцию, устраняя искажения, возникающие из-за многолучевого распространения и других помех. LMS (Least Mean Squares) эквалайзеры обладают быстрым процессом обучения и требуют невысоких объемов памяти для хранения коэффициентов, что делает их эффективными для применения в радиосистемах. RLS эффективно определяет каждый новый коэффициент на основе предыдущих значений. Такой подход позволяет снижать уровень межсимвольной интерференции в частотно-селективных каналах радиосвязи, причем при нулевой импульсной характеристике канала шум не усиливается.

В линейных и нелинейных структурах эквалайзеров применяются разные алгоритмы для установки весовых коэффициентов [16]. Эти коэффициенты зависят от:

- ◆ значений весовых коэффициентов на предыдущем периоде;
- ◆ сигнала на входе эквалайзера;
- ◆ сигнала на выходе эквалайзера;
- ◆ эталонного сигнала (целевого сигнала), с которым производится сравнение.

В результате был использован при моделировании наиболее эффективный алгоритм для определения коэффициентов эквалайзера в дециметровом радиоканале ионосферной радиосвязи на основе алгоритма RLS DFE (рекурсивный алгоритм наименьших квадратов с обратной связью) [17]. Этот алгоритм позволяет минимизировать среднеквадратическую ошибку между ожидаемым выходом фильтра и фактическим выходом, что достигается путем обновления коэффициентов эквалайзера на каждой итерации.

Так алгоритм работы эквалайзера состоит из следующих шагов:

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 (целевым сигналом) и фактическим выходом фильтра. Эта разница называется ошибкой, которую необходимо минимизировать [18].

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.

Таким образом, данный алгоритм позволяет не только минимизировать ошибки передачи, но и адаптировать систему радиосвязи к динамичным условиям радиоканала. Итоговый вариант применяемого в радиоканале алгоритма адаптации представлен на рис. 3.

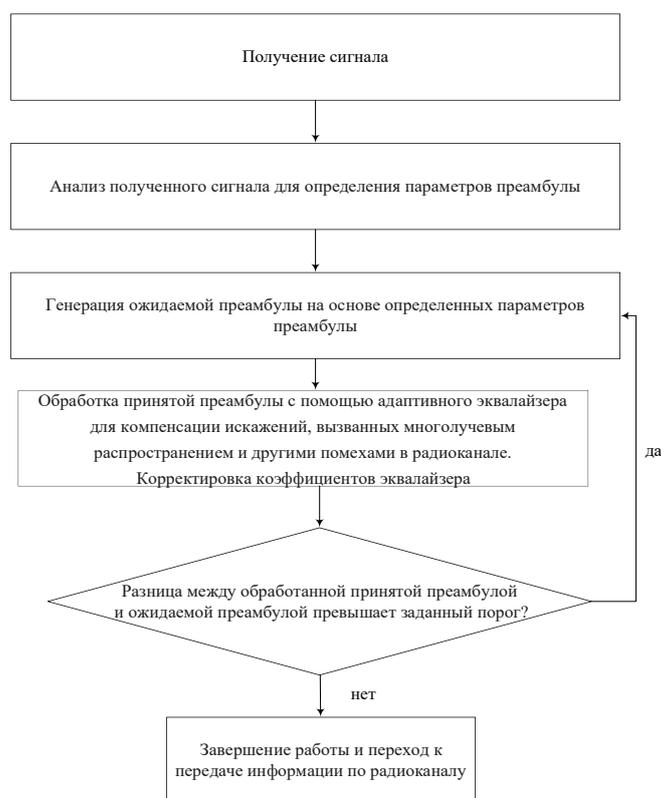


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы адаптивного эквалайзера

Сравнение обработанной принятой преамбулы с ожидаемой является ключевым этапом в процессе настройки эквалайзера [19]. Если разница между этими двумя последовательностями превышает заданный порог, это сигнализирует о необходимости корректировки коэффициентов эквалайзера. Эта корректировка направлена на уменьшение искажений в принимаемом сигнале.

Как только эквалайзер достигнет оптимальных значений коэффициентов, система переходит к передаче информации по радиоканалу. На этом этапе эквалайзер будет работать с установленными параметрами, что позволяет поддерживать высокое качество связи даже в условиях, характеризующихся сложными и переменчивыми условиями передачи, такими как изменения в структуре ионосферы.

Исследование производительности эквалайзера на базе программной среды моделирования Simulink является важным шагом для оценки его эффективности в цифровых системах связи. С помощью этого инструмента можно легко настроить и варьировать

различные параметры эквалайзера, а также анализировать его работу в условиях влияния каналов с многолучевостью и помехами [19]. Процесс исследования нацеливается на определение представленных параметров эквалайзера для достижения лучшей помехоустойчивости в условиях реального радиоканала связи. При помощи Simulink можно провести мультипараметрическое исследование, варьируя один или несколько параметров одновременно и анализируя поведение эквалайзера по различным критериям, таким как уровень ошибок, скорость адаптации и ОСШ принимаемого сигнала.

Исследование эквалайзера производилось на основе цифровой системы связи (стандарт (модель системы) MIL-STD 110D), которая включает в себя несколько ключевых компонентов:

- ◆ сверточное кодирование (1/2): сверточные кодеры используются для обеспечения надежной передачи данных с помощью добавления избыточности. Код 1/2 означает, что на выходе кода количество битов удваивается по сравнению с входящими данными, что улучшает устойчивость к ошибкам;

- ◆ блочное кодирование (31, 23): блочные кодеры работают с фиксированными блоками данных и обеспечивают исправление ошибок. Например, код (31, 23) указывает на то, что из 31 бита данных 23 бита используются для передачи полезной информации, а остальные являются избыточными для защиты от ошибок;

- ◆ перемежитель (20×20): перемежитель используется для рассеивания ошибок и улучшения передачи данных в системах связи. Он разбивает данные на блоки и повторно комбинирует их, что повышает устойчивость к помехам и улучшает общее качество связи.

В процессе исследования были выявлены оптимальные параметры настройки эквалайзеров для различных сценариев работы в радиоканале. Эти комбинации параметров могут включать [20]:

- ◆ длину линии задержки (позволяет улучшить адаптивность эквалайзера к изменениям в канале);

- ◆ коэффициенты фильтров (пересчитанные значения помогают минимизировать искажения);

- ◆ коэффициент забывания (ускоряет или замедляет процесс адаптации фильтра к изменениям в канале).

5. Результаты проведенных исследований на трассовых испытаниях. Проведенные исследования, а также полученные результаты по моделированию работы декаметрового радиоканала привели к необходимости организации трассовых испытаний. Эксперимент, который состоялся в ноябре 2024 года между двумя стационарными позициями в Санкт-Петербурге и Иркутске на расстоянии 4 450 км, стал следующим шагом в исследовании. Ионосферное распространение радиоволн с двумя точками отражения предоставляет уникальную возможность анализировать реальные условия передачи сигналов на больших расстояниях. Адаптивные технологии, основанные на этих исследованиях, показывают потенциал в обеспечении более высокой надежности и стабильности связи, что критично для многих приложений, включая экстренные службы, авиацию и морскую связь. В табл. 1 приведены уровни мощности, зафиксированные при проведении эксперимента.

Таблица 1

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. 4 представлено теоретическое отображение точек отражения радиоволны от ионосферы и поверхности земли, взятый из расчетной модели при подготовке к началу сеанса связи.

Рис. 4 позволяет визуализировать путь, по которому проходит радиосигнал, где синие точки – точки отражения от ионосферы, красные – от поверхности Земли.

Для проведения трассовых испытаний в рамках исследования улучшения помехоустойчивости цифровой системы радиосвязи был использован следующий комплект оборудования:

1. Трансивер Icom IC-7300: этот многофункциональный трансивер предназначен для работы в различных диапазонах частот и предлагает широкий спектр возможностей, включая цифровые режимы передачи.

2. Антенна магнитная SpiderLoop A100: Эта антенна является компактным и эффективным решением для работы в диапазоне коротких волн (КВ). SpiderLoop A100 обладает хорошими характеристиками направленности и поддерживает широкую полосу частот.

3. Прочее вспомогательное оборудование: В состав вспомогательного оборудования вошли источники питания и фидерные линии с импедансом 50 Ом, которые обеспечивали надежное подключение трансивера и антенны. Использование качественных фидерных линий крайне важно для минимизации потерь сигнала и обеспечения стабильной работы всей системы.

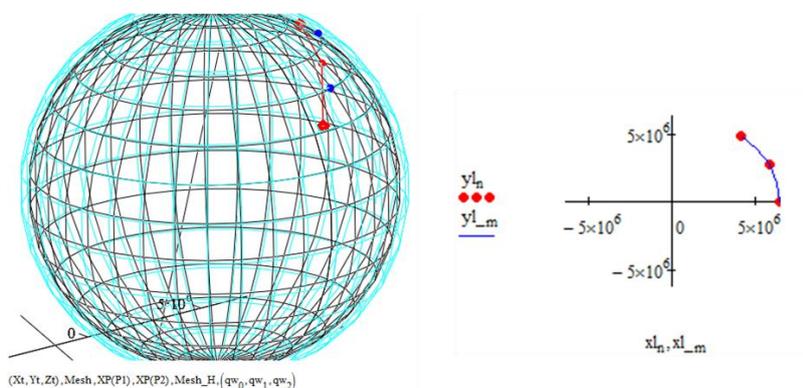


Рис. 4. Отображение точек отражения радиоволны на пути распространения



Рис. 5. Оборудование корреспондентов радиолинии

На рис. 5 представлен общий вид оборудования, использованного при проведении трассовых испытаний [2].

Это изображение позволяет лучше понять конфигурацию экспериментальной установки и взаимодействие элементов системы.

Для проведения эксперимента по исследованию помехоустойчивости цифровой системы радиосвязи был выбран сигнал с фазовой манипуляцией (BPSK) со следующими параметрами:

- ◆ скорость передачи данных: 800 бит/с;
- ◆ длительность сигнала: 5 секунд;
- ◆ частота дискретизации: 8 000 Гц.

С помощью функции «pskmod» в программной среде Simulink был сформирован сигнал BPSK. В результате был получен вектор данных, содержащий 40 000 отсчетов. Полученный вектор данных был вставлен в заранее созданный «чистый» файл формата WAV. Это позволило обеспечить совместимость с воспроизведением звуковых частот через трансивер. Передача файла производилась с трансивера Icom IC-7300 при помощи стандартной функции воспроизведения WAV файлов. Такой подход позволил использовать цифровые режимы передачи, обеспечивая более высокое качество и надежность по сравнению с аналоговыми сигналами.

В результате проведенного эксперимента удалось создать проверенный BPSK сигнал, который затем был передан на значительном расстоянии подключения радиоканала. Полученные данные и результаты обеспечивают важную основу для дальнейшего анализа, включая оценку помехоустойчивости системы и параметров работы эквалайзеров в условиях реального ДКМ радиоканала [21].

Прием сигнала на стороне получателя осуществлялся с использованием встроенных средств трансивера Icom IC-7300, который обеспечивает высококачественную запись демодулированного сигнала в полосе звуковых частот. Основные параметры для записи принятого сигнала это использование цифрового полосового фильтра (0.3–3.1 КГц). Этот диапазон соответствует частотам, необходимым для обработки BPSK сигналов, минимизируя влияние шумов и интерференций из других диапазонов.

Запись радиоэфира начиналась по предварительной договоренности между абонентами испытываемого радиоканала и останавливалась сразу после окончания передачи сигнала, который обнаруживался "на слух". Записанный файл имел формат WAV и сохранил те же параметры, что и передаваемый файл, что позволяет в дальнейшем проводить сравнительный анализ. Процесс исследования нацеливается на определение представленных параметров эквалайзера для достижения лучшей помехоустойчивости в условиях реального радиоканала связи. При помощи Matlab Simulink можно провести мультипараметрическое исследование, варьируя один или несколько параметров одновременно и анализируя поведение эквалайзера по различным критериям, таким как уровень ошибок, скорость адаптации и ОСШ принимаемого сигнала.

Полученные записи сигналов позволяет выполнить анализ двух сигналов в векторной форме с использованием Simulink. Это важный этап при оценке качества передачи и помехоустойчивости. Для обнаружения сигнала в заранее записанном файле была использована функция «Xcorr». Эта функция вычисляет взаимную корреляцию между двумя векторами и позволяет определить степень схожести между переданным и принятым сигналами.

Анализ полученной взаимной корреляции позволяет сделать следующие выводы: пик в графике корреляции указывает на успешное обнаружение сигнала. Чем выше значение корреляции, тем ближе принятый сигнал к исходному сигналу. Распределение значений корреляции также может дать представление о наличии шумов и возможной интерференции [22].

В процессе записи радиоэфира была учтена особенность, что запись начиналась заранее, до появления BPSK сигнала. Это привело к тому, что около половины длительности принятого сигнала содержит собственный шум радиоприемника. Обнаружение нужного сигнала происходило в середине файла, что создало определенные сложности при анализе. Неполная магнитуда работы коррелятора связана с наличием битовых ошибок в принятом файле. Эти ошибки могли быть вызваны несколькими факторами:

1. Проблемы с ионосферным каналом: нестационарный характер ионосферного взаимодействия может вызывать флуктуации сигнала, что приводит к потере информации и возникновению помех [23].

2. Влияние шумов: шумы радиоприемника и внешние интерференции также могут ухудшать качество принятого сигнала, создавая дополнительные помехи, которые влияют на точность корреляции.

После успешного обнаружения сигнала в векторной форме был выполнен процесс наложения спектров переданного и принятого сигналов для их однозначной идентификации. На рис. 6 представлен результат наложения спектров переданного и принятого сигналов.

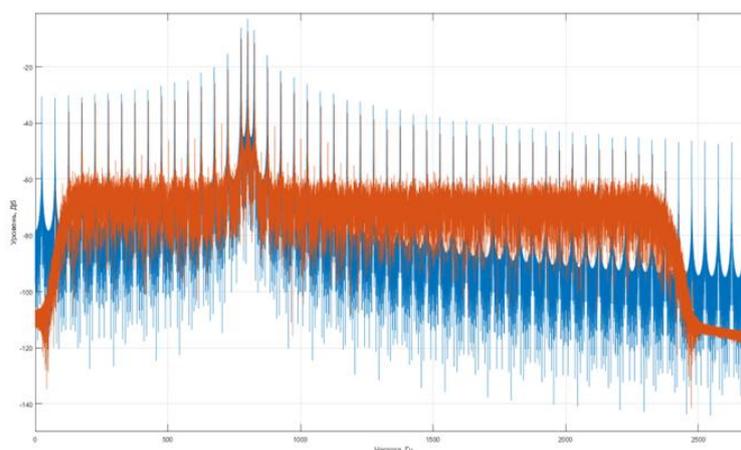


Рис. 6. Спектры переданного (синий цвет) и принятого (оранжевый цвет) сигналов

На рис. 7 видно, что спектры переданного и принятого сигналов хорошо совпадают, что свидетельствует о том, что сигнал был идентифицирован верно. Это подтверждает корректность передачи BPSK сигнала и эффективность используемых технологий радиосвязи. При наложении спектров можно выделить:

- ◆ сравнение амплитуд: уровень амплитуды сигналов позволяет оценить, насколько корректно был принят сигнал;
- ◆ фазовые искажения: анализ наложенных спектров также позволяет выявить возможные фазовые искажения, которые могут указывать на изменения в распространении сигнала.

При углубленном анализе спектральных составляющих обнаружено несовпадение частот переданного и принятого сигналов. Это несоответствие связано с доплеровским сдвигом частоты, который возникает в результате относительного движения между передатчиком и приемником. В данном контексте это может происходить из-за движения атмосферы, а также изменения положения оборудования.

Зависимость повышения помехоустойчивости от работы эквалайзера, выраженная через количество битовых ошибок (BER), от длины преамбулы представлена на рис. 7 [22].

На основе анализа кривых, представленных на рис. 7, можно сделать несколько ключевых наблюдений по эффективности различных длин преамбулы в контексте применения канального эквалайзера:

1. При длине преамбулы в 40 символов и более (в составе пакета 800 бит) достигается приемлемый уровень битовых ошибок ($BER \approx 10^{-3}$) начиная с ОСШ равным 20 дБ.
2. Для преамбулы длиной 100 символов приемлемый BER также достигается при ОСШ равного 20 дБ.
3. Увеличение длины преамбулы более 100 бит не приводит к значительному улучшению помехоустойчивости, что говорит о наличии оптимального диапазона.
4. Без применения канального эквалайзера уровень битовых ошибок составляет 0,5, что указывает на значительное ухудшение качества передачи в условиях ионосферного канала.

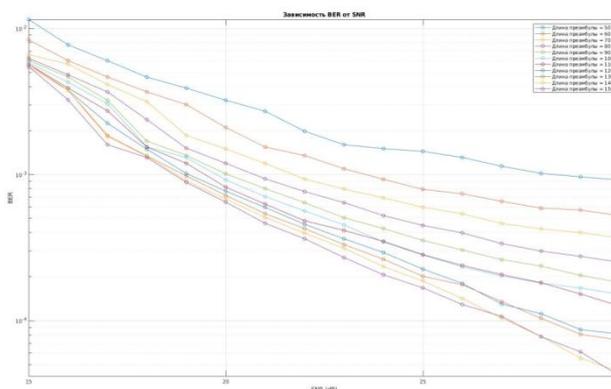


Рис. 7. Зависимость BER от длины преамбулы

В условиях ионосферного канала радиосвязи протяженностью 4450 км использование канального эквалайзера позволило снизить уровень битовых ошибок с 0.5 до 10^{-3} . Оптимальная длина преамбулы должна находиться в диапазоне от 40 до 100 бит в пакете передаваемой информации. Кроме использования эквалайзеров, применение помехоустойчивого кодирования может дополнительно снизить требования к уровню сигнала на 4 дБ, что, тем не менее, может привести к уменьшению скорости передачи полезной информации.

Для информационной скорости 600 бит/с с модуляцией BPSK в условиях Рэлеевского двухлучевого радиоканала с разницей хода лучей 5×10^{-4} с исследования были проведены при различных длинах преамбулы (50, 70 и 100 бит), что позволило понять, как изменение длины преамбулы повлияло на качество и надежность передачи данных в ДКМ радиоканале.

При подстройке эквалайзера на работу радиоканала с настройками для передачи сигнала с BPSK – параметры Forward Taps [19] играют ключевую роль в компенсации фазовых искажений, вызванных каналом передачи сигнала. 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 (лат. ISI) 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. Однако в текущем первичном исследовании установка параметра Feedback Taps равным 1 является подходящим решением, поскольку это позволяет сосредоточиться на адаптации Forward Taps, тем самым позволив наилучшим образом компенсировать фазовые искажения. Reference Taps определяют количество отводов линии задержки и в данном случае устанавливаются равными 10. Повышение количества Reference Taps, например, до 11, не приводит к значительным улучшениям в качестве компенсации. Это может свидетельствовать о том, что система уже достаточно скомпенсирована с текущим количеством отводов, и добавление дополнительных «Taps» не дает дополнительного выигрыша по качеству принимаемого в радиоканале сигнала. В табл. 2 продемонстрированы результаты по уровням BER при различных длинах Forward Taps.

По итогам проведенного анализа (табл. 2) и реальных данных трассовых испытаний эквалайзера, был установлен оптимальный набор параметров, которые обеспечивают наименьшее количество битовых ошибок (BER) для различных длин преамбулы. Установлен оптимальный набор параметров, которые обеспечивают наименьшее количество битовых ошибок (BER) для различных длин преамбулы:

- ◆ Forward Taps: 10 – это значение показало самые лучшие результаты по снижению числа ошибок для всех длин преамбулы;

- ◆ Feedback Taps: 1 – изменение 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;
- ◆ Reference Taps: 10 – используется фиксированное количество отводов, что обеспечивает необходимую эффективность эквалайзера.

Таблица 2

Полученные значения 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}

Моделирование работы цифровой системы связи с использованием эквалайзера с заданными параметрами было проведено для модуляции BPSK. Разница хода лучей в рэлеевском двухлучевом радиоканале: 5×10^{-4} с. На рис. 8 представлен спектр сформированного сигнала с преамбулой длиной 50 бит, что является критически важным параметром, так как преамбула служит для эквалайзера в качестве эталона для коррекции искажений. Важно, чтобы спектр был четким и соответствовал ожидаемым значениям, что позволяет сделать вывод по достижению снижения уровня BER и уменьшению влияния помех и искажений – повышению качества принимаемого сигнала.

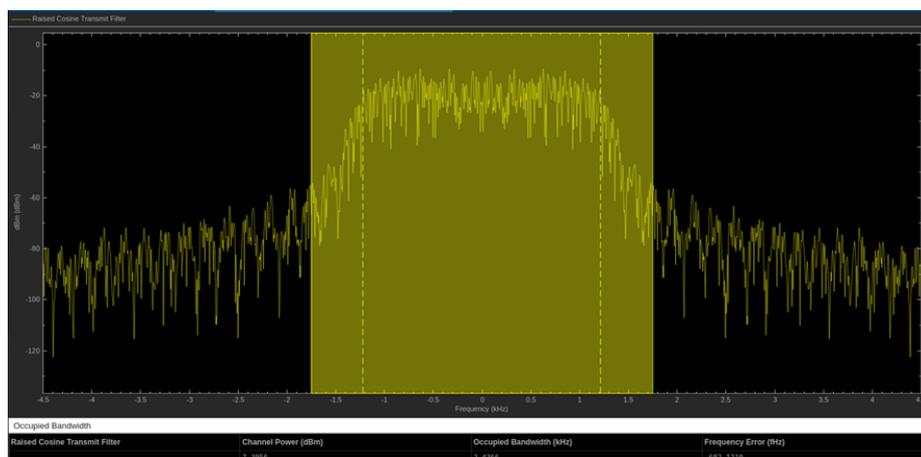


Рис. 8. Спектр сформированного сигнала BPSK

На рис. 9 представлена зависимость уровня BER от ОСШ, при длинах преамбулы от 10 до 100 бит.

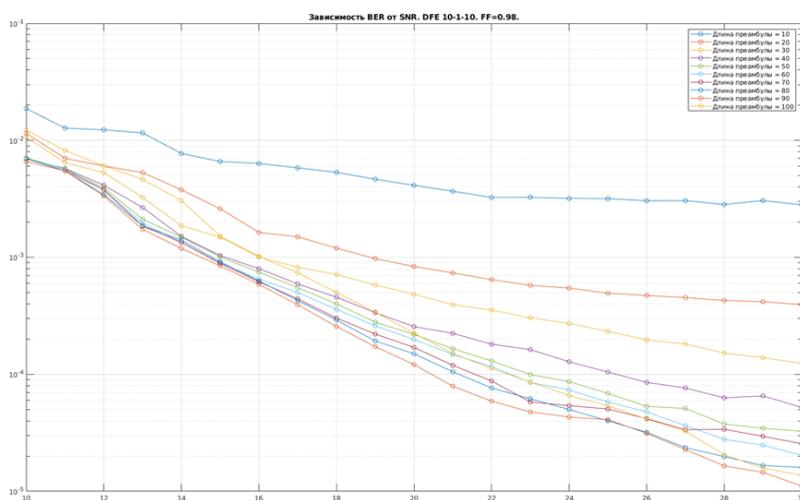


Рис. 9. Зависимость BER от ОСШ для длины преамбулы от 10 до 100 бит (модуляция BPSK)

Этот анализ подчеркивает важные аспекты влияния на качество связи и производительность эквалайзера в контексте ДКМ радиоканала.

Выводы по выбору длин преамбулы и влиянию на уровень BER:

1. Использование преамбулы длиной от 10 бит приводит к BER, превышающему уровень 10^{-3} , что не удовлетворяет минимальным требованиям качества цифровой связи.
2. При длине преамбулы 20 бит наблюдается улучшение качества связи, однако уровень ослабления сигнала (ОСШ на уровне 19 дБ) является недостаточным для получения дальнейшего качественного приема.
3. В диапазоне длин преамбулы от 50 до 100 бит уровень BER достигает 10^{-3} , при ОСШ от 13,5 до 15 дБ, что демонстрирует ранее не достигнутое улучшение качества связи.

На основе приведенных данных можно сделать вывод, что для заданных условий распространения радиосигнала и скорости передачи данных наиболее оптимальной длиной преамбулы является 50 бит. Это значение обеспечивает приемлемое качество связи при достаточно низком уровне BER и минимальных требованиях к ОСШ.

Выводы и рекомендации. Исследование зависимости BER от длины преамбулы и конфигурации обратной связи в эквалайзере подчеркивает значимость правильных параметров настройки для достижения помехоустойчивой передачи данных по радиоканалам.

Выводы по решению комплексной задачи исследования и рекомендации по применению конфигураций эквалайзера на приемной стороне декаметрового радиоканала:

1. При реализации решений для реальных радиоканалов целесообразно оптимально настраивать длину линии задержки в обратной связи (Feedback Taps) в зависимости от наблюдаемых условий канала. Это позволит находить баланс между сложностью эквалайзера и его производительностью.
2. Система оценки. Рекомендовано проводить оценки работы эквалайзера в реальных условиях, чтобы подтвердить эффективность найденных оптимальных настроек. Это позволит адаптировать параметры эквалайзера к специфическим требованиям различного окружения и условий распространения радиосигнала.
3. Оптимизация для следующих исследований. В будущем можно исследовать возможность работы с различными модуляциями и изменениями условий подготовки сигналов, что может помочь в дальнейшем оптимизировать настройки эквалайзеров и улучшить качество дальнеймагистральной декаметрового радиосвязи.

Исследование зависимости BER от длины преамбулы и конфигурации обратной связи в эквалайзере подчеркивает значимость правильных параметров настройки для достижения помехоустойчивой передачи данных по радиоканалам.

Научная новизна проведенного исследования заключается в применении разработанных конфигурационных файлов настройки эквалайзера, которые впервые учитывают соотношение размера информационного сообщения к размеру преамбулы для заданной в сеансе связи помехоустойчивости.

Проведенная 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 13,5 дБ с вероятностью ошибки не более 10^{-3} без предварительного зондирования ионосферы.

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании варьирования длины преамбулы, как средства адаптации эквалайзера в заданном сценарии помехоустойчивости.

Практическая значимость работы заключается в подтверждении возможности работы ДКМ радиолинии при отношении сигнал/шум от 13,5 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.

Оптимизация длины преамбулы позволяет значительно улучшить производительность и снизить количество битовых ошибок. Эти результаты подчеркивают важность тщательного проектирования систем радиосвязи и настройки адаптивных алгоритмов, что будет способствовать повышению надежности передачи данных и улучшению общего качества связи. Данная работа открывает новые горизонты для исследований в области адаптивной фильтрации и эквализации, нацеленных на борьбу с проблемами, возникающими в результате динамичных условий распространения радиоволн в ионосфере.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьев О.В., Рыбаков А.И. Вариант реализации двунаправленной связи в СМС (системе метеорной связи). Описание программно-аппаратного комплекса СМС // Матер. VII Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании». – 2017. – С. 128.
2. Воробьев О.В., Рыбаков А.И. Разработка мобильной системы информационного обеспечения с использованием каналов метеорной связи // Матер. VI Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании». – 2016. – С. 177.
3. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн: монография. – М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.
4. Зюко А.Г., Фалько А.И., Панфилов И.П. [и др.]. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. – М.: Радио и связь, 1985.
5. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В. / под ред. Кловского Д.Д. Теория электрической связи: учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1999. – 432 с.
6. Кларк Дж. Кодирование с направлением ошибок в системах цифровой связи. – М.: Мир, 1987.
7. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролируемых ошибки. – М.: Мир, 1986.
8. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. – М.: Техносфера, 2005.
9. Попов Н.А., Пятаков А.И. Расчет территориального распределения уровней сигнала на многокаскатовых радиотрассах от КВ передатчика средней мощности с антенной “Ромб” // Автоматизация процессов управления. – 2009. – № 1 (15).
10. Прокис Дж. Цифровая связь. – М.: Радио и связь, 2000.
11. Баян А.М. Способ кодирования в системах управления энергообеспечением // Естественные и технические науки. – 2012. – № 3. – С. 238-239.

12. Самойлов А.Г., Сидоренко А.А. Применение кодов РС в каскаде с двоичными кодами с целью повышения эффективности борьбы с независимыми ошибками // Проектирование и технология электронных средств. – 2014. – № 3. – С. 2-7.
13. Сидоренко А.А. Адаптивное помехоустойчивое кодирование // Матер. X международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации». – Владимир-Суздаль, 2013. – Т. 1. – С. 152-154.
14. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. – М.: Радио и связь, 2001.
15. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн: монография. – М.: Сов. радио, 1972. – 464 с.
16. Ахметьянов К.К., Глушков В.А., Дормидонтов А.В., Нестеренко А.Г. Теория электрической связи / под общ. ред. Васильева К.К. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 382 с.
17. Hunt B.T., Naab D.B., Sego T.C., Holschuh T.V., Moradi Hunt H. Examining the Performance of MIL-STD-188-110D Waveform 0 Against FBMC-SS Over Skywave HF Channels // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2022. – Vol. 71, No. 11.
18. Zhang Z., Jin Z., Li Y., Song G., Wang Y. Multi-Stage Receiver of MIL-STD-188-110D Waveform 0 for High-Frequency Communication // IEEE Communications Letters. – 2024. – Vol. 28, No. 5.
19. MIL-STD-188-110D – Interoperability and Performance Standards for Data Modems. 27 APRIL 2000.
20. Мартышевская Д.А., Полушин П.А. Моделирование сверточного метода обработки сигналов при межсимвольной интерференции // XXI МНК студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии»: Сб. докладов. – Томск: ТПУ, 2015. – С. 437.
21. Нарышкин Е.М., Серков В.П. Волновая служба и антенные устройства. Ч. 1. Теория электромагнитного поля и распространение радиоволн: монография. – М.: Воениздат, 1982. – 288 с.
22. Скляр Б. Цифровая связь. – М.: Издательский дом Вильямс, 2003. – 1104 с.
23. Шеннон К. Математическая теория связи. Работы по теории информации и кибернетики. – М.: Наука, 1963.

REFERENCES

1. Vorob'ev O.V., Rybakov A.I. Variant realizatsii dvunapravlennoy svyazi v SMS (sisteme meteornoy svyazi). Opisanie programmno-apparatnogo kompleksa SMS [A variant of implementing bidirectional communication in SMS (Meteor Communication System). Description of the software and hardware complex of SMS], *Mater. VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy i nauchno-metodicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy infokommunikatsiy v nauke i obrazovanii»* [Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference "Current Problems of Infocommunications in Science and Education"], 2017, pp. 128.
2. Vorob'ev O.V., Rybakov A.I. Razrabotka mobil'noy sistemy informatsionnogo obespecheniya s ispol'zovaniem kanalov meteornoy svyazi [Development of a mobile information support system using meteor communication channels], *Mater. VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy i nauchno-metodicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy infokommunikatsiy v nauke i obrazovanii»* [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference "Current Problems of Infocommunications in Science and Education"], 2016, pp. 177.
3. Grudinskaya G.P. Rasprostranenie radiovoln: monografiya [Propagation of radio waves: monograph]. Moscow: Vysshaya shkola, 1975, 280 p.
4. Zyuko A.G., Fal'ko A.I., Panfilov I.P. [i dr.]. Pomekhoustoychivost' i effektivnost' sistem peredachi informatsii [Noise immunity and efficiency of information transmission systems]. Moscow: Radio i svyaz', 1985.
5. Zyuko A.G., Klovskiy D.D., Korzhik V.I., Nazarov M.V. Ed. by Klovskiy D.D. Teoriya elektricheskoy svyazi: uchebnik dlya vuzov [Theory of Electric Communication: textbook for higher education institutions]. Moscow: Radio i svyaz', 1999, 432 p.
6. Klark Dzh. Kodirovanie s napravleniem oshibok v sistemakh tsifrovoy svyazi [Coding with error control in digital communication systems]. Moscow: Mir, 1987.
7. Bleykhut R. Teoriya i praktika kodov, kontroliruyushchikh oshibki [Theory and practice of error-control codes]. Moscow: Mir, 1986.
8. Morelos-Saragosa R. Iskusstvo pomekhoustoychivogo kodirovaniya. Metody, algoritmy, primeneniye [The art of noise-immunity coding. Methods, algorithms, applications]. Moscow: Tekhnosfera, 2005.
9. Popov N.A., Pyatakov A.I. Raschet territorial'nogo raspredeleniya urovney signala na mnogokachkovykh radiotrassakh ot KV peredatchika sredney moshchnosti s antennoy "Romb" [Calculation of the territorial distribution of signal levels on multi-hop radio links from an HF transmitter of average power with a "Rhombus" antenna], *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2009, No. 1 (15).
10. Prokis Dzh. Tsifrovaya svyaz' [Digital communication]. Moscow: Radio i svyaz', 2000.

11. Bain A.M. Sposob kodirovaniya v sistemakh upravleniya energoobespecheniem [Encoding method in energy management systems], *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Technical Sciences], 2012, No. 3, pp. 238-239.
12. Samoylov A.G., Sidorenko A.A. Primenenie kodov RS v kaskade s dvoichnymi kodami s tsel'yu povysheniya effektivnosti bor'by s nezavisimymi oshibkami [Application of RS codes in cascade with binary codes to increase efficiency in combating independent errors], *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and Technology of Electronic Devices], 2014, No. 3, pp. 2-7.
13. Sidorenko A.A. Adaptivnoe pomekhoustoychivoe kodirovanie [Adaptive noise-immune coding], *Mater. X mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Perspektivnye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii»* [Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference "Promising Technologies in Information Transmission Means"]. Vladimir-Suzdal', 2013, Vol. 1, pp. 152-154.
14. Feer K. Besprovodnaya tsifrovaya svyaz'. Metody modulyatsii i rasshireniya spektra [Wireless digital communication. modulation and spread spectrum techniques]. Moscow: Radio i svyaz', 2001.
15. Chernyy F.B. Rasprostranenie radiovoln: monografiya [Propagation of radio waves: monograph]. Moscow: Sov. radio, 1972, 464 p.
16. Akhmetyanov K.K., Glushkov V.A., Dormidontov A.V., Nesterenko A.G. Teoriya elektricheskoy svyazi [Theory of electric communication], ed. by Vasil'eva K.K. Ul'yanovsk: UIGTU, 2008, 382 p.
17. Hunt B.T., Haab D.B., Sego T.C., Holschuh T.V., Moradi Hunt H. Examining the Performance of MIL-STD-188-110D Waveform 0 Against FBMC-SS Over Skywave HF Channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, Vol. 71, No. 11.
18. Zhang Z., Jin Z., Li Y., Song G., Wang Y. Multi-Stage Receiver of MIL-STD-188-110D Waveform 0 for High-Frequency Communication, *IEEE Communications Letters*, 2024, Vol. 28, No. 5.
19. MIL-STD-188-110D – Interoperability and Performance Standards for Data Modems. 27 APRIL 2000.
20. Martyshevskaya D.A., Polushin P.A. Modelirovanie svertochnogo metoda obrabotki signalov pri mezhsimvol'noy interferentsii [Modeling of convolutional signal processing methods under inter-symbol interference], *XXI MNK studentov i molodykh uchenykh «Sovremennye tekhnika i tekhnologii»: Sb. dokladov* [XXI Conference of Students and Young Scientists "Modern Techniques and Technologies": Collection of Reports]. Tomsk: TPU, 2015, pp. 437.
21. Naryshkin E.M., Serkov V.P. Volnovaya sluzhba i antennoye ustroystvo. Ch. 1. Teoriya elektromagnitnogo polya i rasprostranenie radiovoln: monografiya [Wave service and antenna devices. Part 1. Theory of electromagnetic field and radio wave propagation: monograph]. Moscow: Voenizdat, 1982, 288 p.
22. Sklyar B. Tsifrovaya svyaz' [Digital communication]. Moscow: Izdatel'skiy dom Vil'yams, 2003, 1104 p.
23. Shennon K. Matematicheskaya teoriya svyazi. Raboty po teorii informatsii i kibernetiki [Mathematical Theory of Communication. Works on Information Theory and Cybernetics]. Moscow: Nauka, 1963.

Рыбаков Алексей Игоревич – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; e-mail: lexus.r1@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; старший преподаватель кафедры беспроводных технологий и систем.

Rybakov Alexey Igorevich – St. Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich; e-mail: lexus.r1@gmail.com; St. Petersburg, Russia; senior lecturer at the Department of Wireless Technologies and Systems.

УДК 681.1

DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-227-236

В.П. Федосов, А.В. Циркуленко

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ММО-OFDM К АКТИВНЫМ ПОМЕХАМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ

Современные системы связи часто работают в условиях сложной помехово-сигнальной обстановки, при этом существуют разные способы уменьшения ошибки восстановленного сигнала. Часть способов касается непосредственно математических алгоритмов обработки в приемнике, таких, однако есть и другие подходы, основанные на пространственной фильтрации сигналов. В частности, в последние годы активно получил развитие подход, основанный на весовой обработке сигналов, полученных с разных антенн, с использованием корреляционной матрицы входного сигнала, что позволяет более эффективно использовать информацию с антенн за счет выбора