

Научная статья

УДК 621.396.6

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-2-56-66>

EDN:KVNRSН



Разработка расчетной модели радиотрассы систем дальнемагистральной связи декаметрового диапазона для анализа параметров ионосферного канала

Алексей Игоревич Рыбаков ✉, rybakov.ai@sut.ru

Григорий Алексеевич Фокин, fokin.ga@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. В системах дальнемагистральной связи декаметрового (ДКМ) диапазона на количество битовых ошибок одновременно влияют два ключевых фактора: соотношение сигнал / шум и степень фазовых искажений, вызванных доплеровским сдвигом, возникающим из-за случайного движения неоднородностей ионосферы. Проблема повышения помехоустойчивости таких систем осложняется тем, что даже при высоком уровне сигнала на входе демодулятора прием может затрудняться фазовыми искажениями, которые приводят к резкому увеличению количества битовых ошибок и ухудшению коэффициента BER. Несмотря на достаточное число классических работ, проблема повышения помехоустойчивости современных отечественных систем ДКМ радиосвязи в заданных сценариях функционирования с использованием современных методов и средств цифровой обработки сигналов остается актуальной и востребованной.

Объектом исследования являются современные отечественные системы ДКМ радиосвязи, которые зачастую демонстрируют известные недостатки, включая низкую адаптивность к изменениям в ионосфере и проблемы с интерференцией сигналов. Например, система Р-016 имеет ограничения по диапазону частот, что делает ее менее эффективной в условиях варьирования ионосферных характеристик, которые влияют на уровень сигналов. Прототипы также могут иметь проблемы с обработкой сигналов, что приводит к возникновению битовых ошибок до 10^{-3} даже при отсутствии заметных помех.

Предметом исследования являются модели и методы функционирования радиотрасс ДКМ радиосвязи.

Задачей исследования является оценка влияния различных факторов, таких как изменение длины преамбулы и использование адаптивных фильтров, на помехоустойчивость системы. Анализ полученных **результатов** показывает, что увеличение длины преамбулы в таких системах способствует повышению помехоустойчивости дальнемагистральной связи. **Научная новизна** заключается в усовершенствовании существующих расчетных моделей радиотрасс в ДКМ диапазоне путем применения комплекса параметров, включающего задаваемое для данного сеанса связи отношение сигнал / шум в радиотрассе и для повышения точности расчета напряженности поля в точке приема, пересчитанные значения критических частот по прогнозам концентрации электронов, а также доплеровский сдвиг для каждого слоя ионосферы.

Практическая значимость результата заключается в повышении помехоустойчивости существующих систем ДКМ радиосвязи в ионосферных условиях распространения.

Ключевые слова: дальнемагистральная система связи, отношение сигнал / шум, помехоустойчивость, декаметровая радиосвязь, эквалайзер, преамбула, адаптивные фильтры

Ссылка для цитирования: Рыбаков А.И., Фокин Г.А. Разработка расчетной модели радиотрассы систем дальнемагистральной связи декаметрового диапазона для анализа параметров ионосферного канала // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 2. С. 56–66. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-2-56-66. EDN:KVNRSН

Original research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-2-56-66>
EDN:KVNRSR

Development of a Radio Wave Propagation Model for Long-Haul Decameter-Band Communication Systems in the Decameter Range for the Analysis of Ionospheric Channel Parameters

Алексей Игоревич Рыбаков ✉, rybakov.ai@sut.ru
Григорий Алексеевич Фокин, fokin.ga@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

Relevance. In long-haul decameter-band (LDB) communication systems, the number of bit errors is simultaneously influenced by two key factors: the signal-to-noise ratio and the degree of phase distortions caused by the Doppler shift, which arises from the random movement of ionospheric inhomogeneities. The challenge of improving the interference resistance of such systems is complicated by the fact that even with a high signal level at the demodulator's input, reception can be hindered by phase distortions, leading to a sharp increase in the number of bit errors and a degradation of the BER (bit error rate) coefficient. Despite the sufficient number of classical works, the problem of enhancing the interference resistance of modern domestic LDB radio communication systems under specified operating scenarios using contemporary methods and digital signal processing tools remains relevant and in demand. lead to a sharp increase in the number of bit errors and a deterioration in the BER coefficient. Despite a sufficient number of classical works, the problem of improving the noise immunity of modern domestic LDB or short-wave (HF) radio communication systems in specified operating scenarios using modern methods and means of digital signal processing (DSP) remains relevant and in demand.

The object of the research is modern domestic decameter-band radio communication systems, which often exhibit known shortcomings, including low adaptability to changes in the ionosphere and issues with signal interference. For example, the R-016 system has limitations in its frequency range, making it less effective under varying ionospheric conditions that affect signal levels. Prototypes may also have problems with signal processing, which leads to bit errors of up to 10^{-3} even in the absence of noticeable interference.

The subject of the study is the models and methods of functioning of LDB decameter-band communication lines.

The objective of the research is to evaluate the impact of various factors, such as changes in preamble length and the use of adaptive filters, on the interference resistance of the system. The analysis of the obtained **results** shows that increasing the preamble length in such systems contributes to enhancing the interference resistance of long-haul communication. **The scientific novelty** lies in the improvement of existing radio propagation models in the decameter range by applying a complex of parameters that includes the signal-to-noise ratio set for a specific communication session in the radio line, and to increase the accuracy of field strength calculations at the receiving point, recalculated values of critical frequencies based on electron concentration forecasts, as well as Doppler shift for each layer of the ionosphere. **The practical significance** of the results lies in the enhancement of the interference resistance of existing decameter-band communication systems in ionospheric propagation conditions.

Keywords: long-range communication system, signal-to-noise ratio, interference immunity, decameter radio communication, equalizer, preamble, adaptive filters

For citation: Rybakov A.I., Fokin G.A. Development of a Radio Wave Propagation Model for Long-Haul Decameter-Band Communication Systems in the Decameter Range for the Analysis of Ionospheric Channel Parameters. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(2):56–66. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-2-56-66. EDN:KVNRSR

1. Введение

Радиосвязь в декаметровом (ДКМ) диапазоне квалифицируется как высокочастотная (ВЧ) коротковолновая (КВ) связь [1]. На протяжении многих лет существования ДКМ радиосвязи считалось, что новые виды связи в конечном итоге ее заменят [2]. Порой действительно автоматизированные сети связи строятся на основе высокоэффективных кабельных и радиорелейных линий. Проблемы связи в малонаселенных, удаленных или труднопроходимых регионах могут быть решены с помощью спутниковых систем связи. Однако вопрос о полном вытеснении ДКМ линий радиосвязи в ближайшем будущем практически не поднимается ни в одной стране мира. Напротив, несмотря на бурное развитие микроволновых средств дальней связи, включая спутниковые системы, в последние годы возрастает интерес к технической реконструкции ДКМ линий радиосвязи [2]. Это основано на оценке ее технического потенциала, экономической эффективности и стратегической роли, как важного резерва. В условиях катастрофической ионизации атмосферы ДКМ линии радиосвязи, вероятно, испытывают такие же трудности, как и другие радиотехнические системы, но при этом они адаптируются и восстанавливаются значительно быстрее [3]. Однако надежность и помехоустойчивость ДКМ линий радиосвязи может быть недостаточно высокой из-за эффектов замираний сигнала при ионосферном распространении и наличия «молчащих зон». Это может привести к существенным потерям информации, если команды управления для крупной региональной системы передаются исключительно по ДКМ линиям радиосвязи. Радиосвязь в ДКМ диапазоне, наряду со спутниковой, продолжает оставаться одним из видов межконтинентальной связи, представляя собой экономичный способ организации дальней радиосвязи для относительно небольшого числа каналов [2, 3]. Это отличает их от систем связи в микроволновых диапазонах, которые, напротив, становятся эффективными только при одновременной передаче нескольких сотен–тысяч телефонных каналов.

Для обеспечения надежной передачи информации на обширных территориях используют различные системы и технические средства связи, которые в совокупности обеспечивают высокую степень надежности информационных коммуникаций в нашей стране [4]. Радиосвязь в ДКМ диапазоне (длина волны 10–100 м) играет ключевую роль как для внутренней, так и для международной связи, включая зональную, подвижную и производственно-диспетчерскую связь общего и ведомственного назначения. Она предоставляет следующие услуги: магистральная связь, радиовещание, служебные линии для наземных станций спутниковой связи, авиационная связь «земля–воздух», мор-

ская связь «берег–судно», связь между судами в морском флоте, радиосвязь Гидрометеослужбы и другие [3]. Следует отметить, что радиосвязь в ДКМ диапазоне часто называют КВ из-за общепринятого обозначения волн длиной от 10 до 100 м как коротких волн.

В исследуемой дальнемагистральной системе связи на количество битовых ошибок одновременно влияют два ключевых фактора: соотношение сигнал / шум и степень фазовых искажений, вызванных доплеровским сдвигом, возникающим из-за случайного движения неоднородностей ионосферы [4]. Это приводит к тому, что даже при высоком уровне сигнала на входе демодулятора прием может затрудняться из-за фазовых искажений, что негативно сказывается на качестве связи [5]. Объектом настоящего исследования являются современные отечественные системы ДКМ радиосвязи. Примерами систем прототипов являются: ПИРС, Р-016 [3], Сердолик и Mesa [6], каждая из которых имеет свои недостатки.

ПИРС (потокосая измерительная радиосистема) обладает ограниченной помехоустойчивостью, что приводит к высокому уровню битовых ошибок в условиях изменчивой ионосферы, особенно при увеличении расстояний передачи. Также ПИРС характеризуется недостатком гибкости в настройках частот.

Система Р-016 [3] имеет низкую устойчивость к фазовым искажениям, возникающим из-за доплеровского сдвига, что ограничивает ее эффективность в динамических условиях. Кроме того, она не обеспечивает необходимую разностную обработку сигналов, что также влияет на качество связи.

Система Сердолик [6] демонстрирует высокую чувствительность к радиочастотным шумам, имея уровень битовых ошибок, достигающий 10^{-4} без адекватной фильтрации сигналов. Также следует отметить, что Сердолик не способен эффективно адаптироваться к изменениям в условиях приема.

Система Mesa [6] часто сталкивается с проблемой «интерференции» от соседних каналов, что ухудшает качество связи. На практике это может привести к потере целых пакетов данных, что также увеличивает количество битовых ошибок.

Предметом исследования выступают модели и методы функционирования радиолиний ДКМ радиосвязи. Их исследование позволяет оценить влияния различных факторов, таких как изменение длины преамбулы и использование адаптивных фильтров, на помехоустойчивость системы.

Для достижения цели повышения помехоустойчивости систем дальнемагистральной связи ДКМ диапазона формализуем далее следующие частные задачи исследования:

1) разработка расчетной модели радиотрассы систем дальнемагистральной связи ДКМ диапазона для определения рекомендуемых параметров работы модели ионосферного канала;

2) разработка эквалайзера и конфигурационных файлов его настройки для обеспечения доставки 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, эквалайзер с конфигурационными файлами настройки и полевые измерения профиля ДКМ радиолинии, для научно обоснованного выбора параметров передачи на основе отношения сигнал / шум с учетом различных длин преамбул.

Комплексной научной задачей исследования является разработка, программная реализация и экспериментальная апробация эквалайзера с конфигурационными файлами настройки, учитывающая расчетную модель радиотрассы и полевые измерения профиля ДКМ радиолинии.

Материал настоящего исследования организован далее следующим образом. В разделе 2 приводится анализ состояния проблемы. Раздел 3 посвящен разработке расчетной модели радиотрассы в ДКМ диапазоне. Разработка 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.

2. Анализ состояния проблемы

Известно, что ДКМ радиосвязь подвержена влиянию ионосферных возмущений и насыщена сигналами помеховых станций, поэтому к ней предъявляются высокие требования к надежности, электромагнитной совместимости и эффективному использованию частотного спектра [5, 7]. В материалах исследования Brandon T. Hunt, David B. Naab, Thomas Cameron Seago и Tom V. Holschuh [8, 9] показана возможность доработки известной модели К. Ватерсона для применения технологии многоантенного приема в условиях многолучевого распространения, специфичных для ДКМ радиоканала. Современные исследования коллектива авторов Zhaoji Zhang, Zhu Jin, Ying Li, Guanghui Song и Yizhuo Wang [9, 10] ориентированы на решение вопросов расширения спектра сигнала с помощью множественных несущих и применения метода Уолша для повышения помехоустойчивости и защищенности в радиоканале.

Научные исследования отечественных ученых, посвященные улучшению качества передачи в ДКМ радиолиниях, проводятся в различных технических вузах. Особого внимания заслуживают исследования А.А. Сидоренко и Д.А. Мартышевой [6, 11, 12] из Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, которые посвящены проблеме подавления межсимвольной интерференции через применение новых алгоритмов и увеличению эффективности использования помехоустойчивых турбокодов. Кроме того, в контексте актуальности темы исследования рассматриваются экспериментальные работы по эквалайзерам на основе нейронных сетей с обучением в многолучевом радиоканале, выполненные на физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова Д.Р. Валиулиным и П.Н. Захаровым [13].

Современные ДКМ линии радиосвязи сталкиваются с рядом технических недостатков, которые требуют комплексного решения и адаптации параметров в зависимости от конкретных условий. К основным проблемам можно отнести непостоянство состояния ионосферы, что приводит к значительным колебаниям ее характеристик в пределах диапазона частот от 10 до 100 МГц, а также сложности с точным прогнозированием этих характеристик на временной промежуток, соответствующий предстоящему сеансу радиосвязи, который может составлять от нескольких часов до суток [12]. Переменяющиеся неоднородности концентрации электронов в ионосфере, которые могут изменяться на уровне от 10^9 до 10^{12} электронов на кубический метр, а также колебания их уровня в различных слоях ионосферы, приводят к изменению высоты переотражения электромагнитной волны. Обычно высота переотражения варьируется от 30 до 1000 км и определяется условиями радиосигнала. Такие изменения вызывают флуктуации мощности огибающей сигнала, которые могут варьироваться от 1 до 10 дБ, и доплеровские смещения на приемной стороне, достигающие десятков герц, что негативно сказывается на качестве связи [14].

Для минимизации указанных недостатков ДКМ радиолиний целесообразно эффективно использовать методы цифровой обработки сигналов при выборе вариантов адаптации параметров передачи. Применение современных алгоритмов, таких как адаптивные фильтры и методы пространственной обработки, могут значительно улучшить стабильность и помехоустойчивость систем связи к динамическим условиям ионосферы. Например, использование эквалайзеров, способных компенсировать флуктуации в диапазоне от 10 до 20 дБ [15], позволяет значительно повысить устойчивость связи и качество передаваемых данных. Это, в свою очередь, ведет к значительному улучшению показателей помехоустойчивости и общей надежности

радиосистем, что становится особенно важным для успешного функционирования радиосвязи на больших расстояниях. Учитывая изложенные выше проблемы, в настоящей работе предполагается провести уточнение существующей методики функционирования ДКМ линий радиосвязи, акцентируя внимание на разработке эквалайзера с конфигурационными файлами, адаптированными к высоким флуктуациям и условиям работы в изменчивой ионосфере. Это позволит не только улуч-

шить надежность передачи данных, но и обеспечить более высокий уровень устойчивости системы к внешним воздействиям, что является ключевым для эффективного использования радиосвязи в данном диапазоне. На рисунке 1 представлена структурная схема типового адаптивного комплекса радиосвязи, которая иллюстрирует компоненты и процессы, позволяющие повысить помехоустойчивость системы, тем самым повысить качество связи в условиях изменения параметров ионосферы.

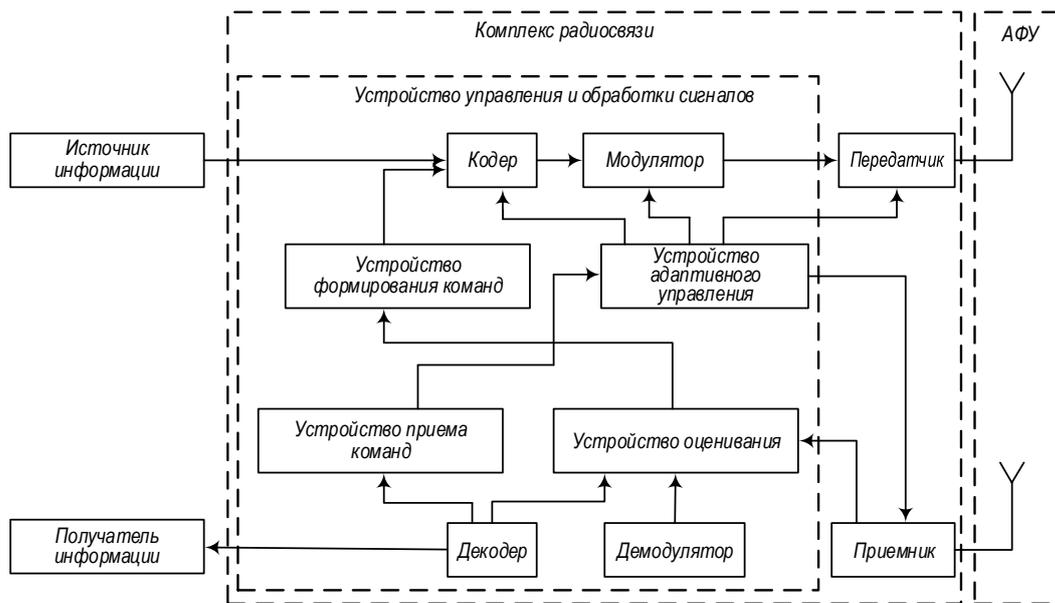


Рис. 1. Структурная схема адаптивного комплекса радиосвязи

Fig. 1. Structural Diagram of an Adaptive Radio Communication System

Для реализации схемы адаптивного комплекса радиосвязи (см. рисунок 1) в настоящее время используются современные персональные электронно-вычислительные машины, работающие под управлением адаптивных алгоритмов [15, 16]. Подобная реализация открывает новые возможности для более точного и быстрого анализа состояния ДКМ радиолиний, позволяя автоматизировать алгоритмы на основе методов конечных элементов и численные методы решения дифференциальных уравнений.

Данный подход особенно актуален в условиях динамической и изменчивой ионосферы, где необходимо учитывать большое количество переменных и факторов, способных повлиять на уровень электромагнитного поля (ЭМП). Однако он характеризуется следующими недостатками. Во-первых, не учитываются факторы, связанные с распространением радиоволн по радиотрассе, а также проблемы суперпозиции сигналов в точке приема [15, 16]. Во-вторых, не принимаются во внимание энергетические характеристики радиолиний, включая

диаграммы направленности антенн, уровень необходимой мощности и текущее отношение сигнал / шум в динамически изменяющейся ДКМ радиолинии. С учетом указанных ранее недостатков, в данной работе для повышения помехоустойчивости систем дальнемагистральной связи в ДКМ диапазоне решается частная научная задача по разработке расчетной модели радиотрассы. Эта модель предназначена для определения рекомендуемых параметров работы ионосферного канала, что будет способствовать адаптации работы систем дальнемагистральной связи в условиях данного диапазона.

3. Разработка расчетной модели ДКМ радиолинии

3.1. Постановка задачи

Обычно при работе с ДКМ радиолинией заранее задаются ключевые энергетические параметры радиоаппаратуры, такие как мощность передатчика – $P_{\text{прд}}$, коэффициент усиления (КУ) антенн, и др., что позволяет в итоге разрабатывать технические решения по настройке сигнально-кодовой конструк-

ции (СКК) [12]. Далее приводится расчетная модель радиотрассы систем дальнемагистральной связи ДКМ диапазона, учитывающая параметры конфигурационных файлов и настроек эквалайзера.

Модель К. Ватерсона [5] предназначена для расчета уровней ЭМП в зависимости от условий распространения радиоволн, учитывая факторы, такие как рельеф местности, атмосфера и время суток. Данная модель широко используется для оценки дальности связи и качества сигнала ДКМ радиолиний, так как позволяет исследовать различные сценарии, делит условия функционирования радиотрасс на различные категории (например, плодородные и сложные зоны), что делает ее полезной для практического применения.

Модель А.Н. Казанцева уточняет более специфические параметры, таких как углы падения и отражения радиоволн [4, 5]. Данная модель используется для оценки уровня ЭМП на конкретных маршрутах связи, адаптируясь к местным условиям, что делает ее особенно полезной в сложных ландшафтах.

Объединение моделей А.Н. Казанцева и К. Ватерсона представляется научно обоснованным подходом для уточнения текущих значений уровней ЭМП в точках приема в зависимости от комплекса факторов. Доводами в пользу данного подхода являются следующие обстоятельства. Во-первых, объединение позволяет создавать многоуровневые модели, которые смогут учитывать как статистические, так и детализированные факторы, что особенно важно в условиях, где географические и погодные аспекты играют значительную роль. Во-вторых, совмещение моделей способствует разработке алгоритмов, адаптивных к сценариям конкретных регионов, позволяя более точно планировать размещение антенн и маршруты связи. Для успешного использования моделей их необходимо объединить с учетом калибровки и последующей апробации на экспериментально измеренных профилях ДКМ радиолиний [2].

Разрабатываемая расчетная модель дает возможность определить мощность сигнала на входе приемника в зависимости от параметров передающего и приемного оборудования, основываясь на заданных параметрах СКК (скорость передачи, полосу частот, требуемое отношение сигнал / шум). Расчетная модель, представляемая далее, разработана для того, чтобы определить интервал по времени, который позволяет проводить сеансы связи и выполнять испытания по проверке применимого адаптационного метода. В результате проведения расчета требуемая мощность передатчика для обеспечения уровня битовых ошибок 3×10^{-3} , определена на уровне 10 Вт.

Данные значения обусловлены двумя факторами:

1) значение уровня битовых ошибок в 3×10^{-3} указывает на допустимый уровень ошибок в системе, который считается приемлемым для ряда радиокommunikационных приложений [17]; в разрабатываемой далее модели планируется обеспечить баланс между качеством передачи и мощностью передатчика;

2) уровень 10 Вт выбран на основе анализа параметров ионосферного канала, включая влияние шумов, затухание сигналов и другие факторы, способные ухудшить качество связи [18]; при этой мощности удается на практике достичь наилучшей в заданных условиях помехоустойчивости (мощность может быть снижена до 5 Вт; такое снижение приводит к уменьшению уровня принимаемого сигнала на входе демодулятора на 3 дБ).

Рассматриваемая далее модель представляет собой обобщенную вариацию известных моделей расчета А.Н. Казанцева и К. Ватерсона [4, 5] с использованием данных с ионозонда. В разработанной модели рассчитаны точки отражения от ионосферы и от поверхности Земли. Далее проводится сопоставление полученных точек с прогнозом по статистическим данным модели IRI (*аббр. от англ. International Reference Ionosphere*). Также точки отражения могут сравниваться с данными, полученными с аппаратуры ионозондов о критических частотах в точках отражения. Для протяженной радиотрассы точки отражения находятся в разных частях планеты. Из-за физической особенности среды распространения в нестационарном канале связи Солнце по-разному ионизирует слои ионосферы. Максимальное возможное количество скачков составляет не более шести, т. к. при максимальном их количестве волна обогнет планету полностью. В дальнейшем осуществляется формализация расчетной модели каналов (ДКМ) радиолинии, которая будет включать в себя детальную математическую формулировку процессов передачи информации через радиоканал, учет влияния различных факторов, таких как помехи и искажения, а также применение соответствующих алгоритмов обработки сигналов для повышения помехоустойчивости системы.

3.2. Формализация

Распространение радиоволн в атмосфере сопровождается потерей части электромагнитной энергии при прохождении через слои атмосферы D и E , а также для ДКМ волн, отражающихся от слоя F_2 . Положительная рефракция может вернуть волну обратно на Землю.

Поясним операции вычисления требуемых характеристик сигнала на обобщенной модели рас-

чета параметров ДКМ радиолнии [1, 14]. 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 [14]:

$$\sin \varphi = \sqrt{e_{n(homp)_1}}, \quad (1)$$

где φ – угол входа луча в ионосферу; $e_{n(homp)_1}$ – относительная диэлектрическая проницаемость слоя ионосферы, где произошло отражение.

Условие отражения можно представить следующим образом [16]:

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

В формуле (2) концентрация электронов $Nэ$ соответствует высоте отражения $h_{отр} = h_0 + z_{отр}$. Из условия отражения (2) следует, что волна с частотой f будет отражена на высоте $h_{отр}$ в ионосфере со следующей характеристикой:

$$f = \frac{9 \sqrt{Nэ \left(\frac{\text{эл}}{\text{см}^3}\right)}}{\cos \varphi}. \quad (3)$$

В случае нормального падения волны $\cos \varphi = 1$ отражение описывается следующим образом:

$$f = 9 \sqrt{Nэ \left(\frac{\text{эл}}{\text{см}^3}\right)} = f_0. \quad (4)$$

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

$$f_{кр} = 9 \sqrt{Nэ_{\max}} = f_{0\max}. \quad (5)$$

На частотах $f > f_{кр}$ диэлектрическая проницаемость ионосферы будет положительной $\varepsilon > 0$ и ионосфера будет радиопрозрачной. Критические частоты относятся к ДКМ диапазону $f_{кр} = 3 \div 30$ МГц. При известных средних значениях $Nэ_{\max}$ и полученных радиопрогнозов модели IRI: в дневное время критическая частота соответствует диапазону $f_{кр} = 11 \div 13$ МГц, в ночное – $f_{кр} = 4 \div 6$ МГц. В средних широтах Земли в дневное время критическая частота равна $f_{кр} = 6 \div 8$ МГц, а в ночное – $f_{кр} = 2,5 \div 4,5$ МГц. Исключением являются районы Крайнего Севера в период полярного сияния, поскольку D -слой, благодаря своей высокой плотности, поглощает сигнал вместо его отражения. Плот-

ность нейтральных, неионизированных частиц, которые составляют основную массу в этом регионе, в D -слое в 1000 раз выше, чем в E - и F -слоях.

В случае, когда отражение волны происходит при наклонном падении на ионосферу ($\varphi > 0$), частота радиоволны определяется по закону секанса [1, 14]:

$$f = \frac{9 \sqrt{Nэ \left(\frac{\text{эл}}{\text{см}^3}\right)}}{\cos \varphi} = f_0 \sec \varphi. \quad (6)$$

На больших расстояниях между точкой излучения и точкой приема справедливо следующее выражение для рабочей частоты [15]:

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

где при расстояниях свыше 500 км необходимо учитывать сферичность Земли, и для этого вводят поправочный коэффициент K .

Из формул (2 и 7) получим выражение для поправочного коэффициента:

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

где z_0 – 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 все больших высотах. Наибольшая частота, на которой волна еще испытывает отражение при данном угле падения, называется максимальной.

С увеличением максимальной рабочей частоты отражение происходит на все больших высотах и определяется выражением [16]:

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

Из-за кривизны земной поверхности и удаленности нижней границы ионосферы от поверхности Земли (60 км) угол падения на ионосферу не может достигать 90° [17]. Максимальный угол падения (10) соответствует траектории, проходящей по касательной к поверхности Земли [18].

$$\sin \varphi_{\max} = \frac{R_3}{R_3 + h_0}, \quad (10)$$

где h_0 – нижняя граница ионосферы.

Наиболее высокая частота при максимальном угле входа в атмосферу, которая еще может отражаться в ионосфере, называется предельной [3]:

$$f_{k_{\max}} N\varepsilon = \frac{9 \sqrt{N\varepsilon \left(\frac{\varepsilon_l}{\text{см}^3}\right)}}{\cos \varphi}, f_{k_{\max}} = 4f_{\text{кр}}. \quad (11)$$

Максимальный угол падения волны не может превышать 81,5°, а частота $f_{k_{\max}}$ не может превышать 30 МГц. В ионосфере отражаются волны длиннее 10 м, т. е. те, частота которых меньше 30 МГц. Соответственно, если частота несущей выше 30 МГц, радиоволна выходит за пределы ионосферы. В реальной ионосфере, например, при появлении спорадических слоев E_s отражение может наступить при гораздо больших частотах, в том числе и метрового диапазона. 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 [3, 17]:

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

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

Коэффициент отражения волны R определяется как отношение амплитуд $E_{m_{\text{пад}}}/E_{m_{\text{отр}}}$.

Пусть свойства Земли близки к идеальному диэлектрику. Тогда из (13) следует [16]:

$$E_{m_{\text{пр}}} = \frac{E_{m_{\text{пад}}} + E_{m_{\text{отр}}}}{\sqrt{\varepsilon'_k}}. \quad (14)$$

Подставим формулу (14) в выражение (12) и поделим результат на $E_{m_{\text{пад}}}$. Далее, перейдя к углу скольжения $\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$, с помощью (15) исключим угол ψ так, что справедливо выражение:

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

из которого можно записать формулу коэффициента отражения:

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

Если проводимость почвы $\sigma \neq 0$, то ε'_k является комплексной величиной, из чего следует комплексный характер членов выражения (16), поэтому R_B можно представить в виде [19]:

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

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:

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

Расчет напряженности ЭМП E_c ионосферной волны на ДКМ радиолинии при помощи расчетной методики позволяет проводить оценку уровней ЭМП в регионе ДКМ радиолиний для средних широт. При этом используются типовые данные радиопрогнозов и характеристики подстилающей поверхности (модель IRI), а также заданные энергетические характеристики передатчика и параметры диаграмм направленности антенн. В основу расчетов положены формулы (16, 18) [14, 16].

Напряженность поля в точке приема определяется выражением:

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

где P_1 – мощность передатчика, подводимого к антенне; G_1 – коэффициент усиления антенны; r_L – 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 формуле (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. Расчет полного коэффициента поглощения Γ произведен по методу А.Н. Казанцева. При отражении от слоя E полный коэффициент поглощения Γ на частоте излучения передатчика f определяется по критическим частотам слоя E с использованием выражения [14, 19]:

$$\Gamma = \frac{3(f_0^E)^2 \sec \varphi_0^E}{(f + f_L)^2} + 4 \frac{\cos^2 \varphi_0^E}{f_0^E} f \sqrt{\frac{f}{(f + f_L)}}. \quad (20)$$

Для совершенствования типовой методики расчета уровня напряженности на территории распространения ДКМ радиотрассы была проведена оценка уровня ЭМП от передатчика с антенной, обладающей заданными характеристиками диаграммы направленности. Расчеты на n -скачковой радиотрассе выполняются не в одной точке, а на всей территории региона, и результаты представляются графически в двумерной системе координат. За счет многократных отражений в ионосфере и последующих отражений от земной поверхности

дальняя связь может достигать расстояний в тысячи (даже десятки тысяч) километров при сравнительно небольших мощностях передатчика. Измерения осуществляются с помощью специализированных станций высотного зондирования. На основе полученных данных составляются графики суточного изменения максимально применимых частот (МПЧ), которые рассылаются по различным местам. Оптимальная частота выбирается равной уровню $f = 0,85$ МПЧ. Представленный на рисунке 2 график изменения МПЧ в зависимости от времени суток получен по данным модели IRI. Численно полученный коэффициент перед f_0 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 демонстрирует значения МПЧ (значения f_i), взятые из модели IRI, а нижняя линия показывает оптимальные значения МПЧ (значения f_{opt}).

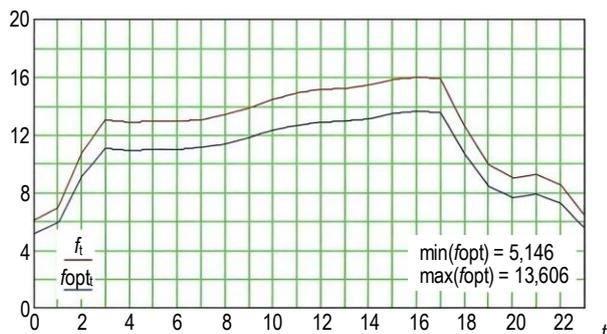


Рис. 2. График изменения МПЧ

Fig. 2. Schedule of Changes in the Maximum Applicable Frequencies

При действующей высоте слоя F_2 основные рабочие частоты, полученные по модели IRI, оцениваются по формуле:

$$f = 0,85f_0. \quad (21)$$

Пересчет МПЧ при работе с ДКМ радиолинией позволяет определить рабочие диапазоны частот для передачи сигналов, учитывая факторы, влияющие на распространение радиоволн [19, 20]. Этот процесс требует учета множества факторов, которые могут существенно влиять на распространение радиоволн, таких как условия ионосферы, время суток, климатические изменения.

Основной задачей расчета является выбор таких частот, которые будут отражаться и пропускаться через многослойную ионосферу в заданных условиях. Это позволяет обеспечить максимальную помехоустойчивость радиосвязи, поскольку правильно выбранные частоты обеспечивают наилучшее взаимодействие с различными слоями ионосферы. Кроме того, правильный расчет применимых частот позволяет установить максимальную

дальность. Это критично для обеспечения стабильной связи, поскольку выбранные частоты должны минимизировать потери сигнала на больших расстояниях, что в конечном итоге повышает помехоустойчивость ДКМ радиолинией. Анализ частот также помогает избежать потенциальных проблем с интерференцией, возникающей из-за передачи на тех же частотах, что и другие радиосигналы. Наконец, расчет максимально применимых частот предоставляет практическое руководство для настройки передающего и приемного оборудования с целью повышения помехоустойчивости ДКМ радиолинией. Это включает в себя использование антенн и усилителей, которые могут быть адаптированы для работы с ДКМ радиолинией.

3.3. Перспективы использования расчетной модели ДКМ радиолинии

Представленная расчетная модель ДКМ радиолинии решает задачу пересчета МПЧ для научно обоснованного выбора подходящих диапазонов передачи сигналов в текущий момент времени. Данная расчетная модель используется, чтобы решить комплексную задачу повышения помехоустойчивости систем дальнемагистральной связи ДКМ радиолинией.

При разработке и конфигурации эквалайзера предложенная в настоящей работе расчетная модель ДКМ радиолинии решает задачу научно-обоснованного выбора частот, которые в данном сценарии эффективно отражаются и пропускаются ионосферой. Обоснованный подбор таких частот позволяет решить задачу достижения максимальной дальности связи в декаметровом диапазоне. Конфигурационные файлы эквалайзера, которые в свою очередь также определяются диапазоном пересчитанной частоты, при этом решают задачу обеспечения максимальной помехоустойчивости. Имитационное моделирование в MatLab позволяет проверить различные конфигурации эквалайзера в условиях рэлеевского канала, и, таким образом, научно обосновать его настройку.

Последующая экспериментальная апробация комплексной модели ДКМ радиолинии также учитывает предложенную в настоящей работе расчетную модель ДКМ радиолинии и конфигурацию эквалайзера с различными длинами преамбул. Полученные средствами имитационного моделирования значения отношения сигнал / шум на входе приемника учитывают модель ДКМ радиолинии и определяют вариативный порядок выбора длины преамбулы. Экспериментальная апробация выбранных длин преамбул в функционирующей системе ДКМ радиолинии для заданного сценария подтверждает практическую применимость предложенного подхода.

Заключение

Предложенная расчетная модель для систем дальнемагистральной радиосвязи в декаметровом диапазоне актуальна и востребована в условиях изменяющейся ионосферы, требующей учета множества переменных и факторов. В рамках будущих исследований будет продемонстрирован алгоритм применения данной модели для настройки эквалайзера на приемной стороне ДКМ радиолинии. Модель будет использоваться для комплексного решения задачи повышения помехоустойчивости

систем дальнемагистральной радиосвязи. При разработке и конфигурации эквалайзера данная модель позволит определить оптимальные частоты, которые в данном сценарии будут эффективно отражаться и пропускаться ионосферой. Обоснованный выбор таких частот способствует максимизации дальности связи в выбранном диапазоне. Конфигурационные файлы эквалайзера, зависящие от диапазона выбранной частоты, будут направлены на обеспечение максимальной помехоустойчивости системы дальнемагистральной радиосвязи.

Список источников

1. Скляр Б. Цифровая связь. М.: Издательский дом Вильямс, 2003. 1104 с.
2. Качнов А.И., Пенкин А.А., Рыбаков А.И. Разработка мобильной системы информационного обеспечения с использованием каналов метеорной связи // V Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 10–11 марта 2016 г.). СПб.: СПбГУТ, 2016. С. 177–181. EDN:WZIKIL
3. Воробьев О.В., Рыбаков А.И. Вариант реализации двунаправленной связи в системе метеорной связи. Описание программно-аппаратного комплекса СМС // VI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 01–02 марта 2017 г.). СПб.: СПбГУТ, 2017. С. 128–133. EDN:ZECEUT
4. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: Сов. Радио, 1972. 464 с.
5. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1975, 280 с.
6. Мартышевская Д.А., Полушин П.А. Моделирование сверточного метода обработки сигналов при межсимвольной интерференции // XXI Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (СТТ-2015, Томск, Российская Федерация, 5–9 октября 2015 г.). Томск: ТПУ, 2015. С. 43–45.
7. Попов Н.А., Пятаков А.И. Расчет территориального распределения уровней сигнала на многоскачковых радиотрассах от КВ передатчика средней мощности с антенной “Ромб” // Автоматизация процессов управления. 2009. № 15. С. 65–73. EDN:KHPEFN
8. Нарышкин Е.М., Серков В.П. Волновая служба и антенные устройства. Ч. 1. Теория электромагнитного поля и распространение радиоволн. М.: Воениздат, 1982. 288 с.
9. Hunt V.T., Naab D.B., Sego T.C., Holschuh T.V., Moradi H., Farhang-Boroujeny B. Hunt 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. Iss. 11. PP. 11637–11649. DOI:10.1109/TVT.2022.3189762
10. 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. Iss. 5. PP. 1166–1170. DOI:10.1109/LCOMM.2024.3375601
11. Самойлов А.Г., Сидоренко А.А. Применения 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.
12. Сидоренко А.А. Адаптивное помехоустойчивое кодирование // Материалы X международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации». Владимир, Суздаль, 2013. Т. 1. С. 152–154.
13. Валиуллин Д.Р., Захаров П.Н. Экспериментальные исследования эквалайзера на основе нейронных сетей с обучением в многолучевом радиоканале // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 12. С. 4. EDN:YNSPDZ
14. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 829 с.
15. Зюко А.Г., Фалько А.И., Панфилов И.П. и др. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. М.: Радио и связь, 1985. 271 с.
16. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В. Теория электрической связи. М.: Радио и связь, 1999. 432 с.
17. Блейхут Р.Э. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 576 с.
18. Кларк Дж., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. Пер. с англ. М.: Мир, 1987.
19. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000.
20. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 2001. 518 с.

References

1. Sklyar B. *Digital communication*. Moscow: Villeyams Publishing House, 2003. 1104 p. (in Russ.)
2. Kachnov A., Penkin A.A., Rybakov A. The Development of Mobile Information Provision Systems Using Meteor Communication Channels. *Proceedings of the Vth International Scientific, Technical and Scientific-Methodological Conference at Actual Problems of Information Communications in Science and Education, 10–11 March 2016, St. Petersburg, Russian Federation*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2016. p.177–181. (in Russ.) EDN:WZIKIL

3. Vorobyov O., Rybakov A. Option Enable Bidirectional Communication In SMS (System Meteor Communication). Description Software-Hardware Complex SMS. *Proceedings of the VIth International Scientific, Technical and Scientific-Methodological Conference at Actual Problems of Information Communications in Science and Education, 01–02 March 2017, St. Petersburg, Russian Federation*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2017. p.128–133. (in Russ.) EDN:ZECEUT
4. Cherny F.B. *Propagation of Radio Waves*. Moscow: Sov. Radio Publ.; 1972. 464 p. (in Russ.)
5. Grudinskaya G.P. *Propagation of Radio Waves*. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1975, 280 p. (in Russ.)
6. Martyshevskaya D.A., Polushin P.A. Modeling of Convolutional Signal Processing Method with Intersymbol Interference. *Proceedings of the Conference of Students and Young Scientists at Modern Engineering and Technology, 5–9 October 2015, Tomsk, Russian Federation*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ.; 2015. p. 43–45. (in Russ.)
7. Popov N.A., Pyatakov A.I. Calculation of the Territorial Distribution of Signal Levels on Multi-Jump Radio Paths from a Medium-Power HF Transmitter with a Rhomb Antenna. *Automation of Control Processes*. 2009;15:65–73. (in Russ.) EDN:KHPEFN
8. Naryshkin E.M., Serkov V.P. *Wave Service and Antenna Devices. Part 1. Theory of the Electromagnetic Field and Propagation of Radio Waves*. Moscow: Voenizdat Publ.; 1982. 288 p. (in Russ.)
9. Hunt B.T., Haab D.B., Segó T.C., Holschuh T.V., Moradi H., Farhang-Boroujeny B. Hunt Examining the Performance of MIL-STD-188-110D Waveform 0 Against FBMC-SS Over Skywave HF Channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2022;71(11):11637–11649. DOI:10.1109/TVT.2022.3189762
10. 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;28(5):1166–1170. DOI:10.1109/LCOMM.2024.3375601
11. Samoilov A.G., Sidorenko A.A. Application of RS codes in a cascade with binary codes in order to increase the effectiveness of combating independent errors. *Design and Technology of Electronic Means*. 2014;(3):2–7. (in Russ.)
12. Sidorenko A.A. Adaptive noise-resistant coding. *Proceedings of the Xth International Scientific and Technical Conference "Promising Technologies in the Media of Information Transmission", vol.1*. Vladimir, Suzdal; 2013. p.152–154. (in Russ.)
13. Valiullin D.R., Zakharov P.N. Experimental studies of an equalizer based on neural networks with training in a multipath radio channel. *Journal of Radio Electronics*. 2017;12:4. (in Russ.) EDN:YNSPDZ
14. Shannon K. *Works on Information Theory and Cybernetics*. Moscow: Izdatelstvo inostrannoi literatury Publ.; 1963. 829 p. (in Russ.)
15. Ziuko A.G., Falko A.I., Panfilov I.P., et al. *Noise Immunity and Efficiency of Information Transmission Systems*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1985. 271 p. (in Russ.)
16. Ziuko A.G., Klovsky D.D., Korzhik V.I., Nazarov M.V. *Theory of Electrical Communication*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1999. 432 p. (in Russ.)
17. Bleihut R.E. *Theory and Practice of Error Controlling Codes*. Addison-Wesley Publishing Company; 1983. 500 p.
18. Clark-Jr. G.C., Cain J.B. *Error-Correcting Coding in Digital Communication Systems*. New York and London: Plenum Press; 1981.
19. Prokis J. *Digital Communications*. McGraw-Hill Science; 2000.
20. Feer K. *Wireless Digital Communication. Methods of Modulation and Spectrum Expansion*. Prentice Hall; 1995.

Статья поступила в редакцию 01.03.2025; одобрена после рецензирования 14.03.2025; принята к публикации 03.04.2025.

The article was submitted 01.03.2025; approved after reviewing 14.03.2025; accepted for publication 03.04.2025.

Информация об авторах:

РЫБАКОВ
Алексей Игоревич

старший преподаватель кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0003-0147-4462>

ФОКИН
Григорий Алексеевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-5358-1895>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.