



КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ/COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.38> EDN: **DZGIIU****ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА В СИСТЕМЕ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ С ВЫБОРОМ КОДА КОРРЕКЦИИ ОШИБОК**

Научная статья

Чернецова Е.А.^{1,*}¹ORCID : 0000-0001-5805-3111;¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (chernetsova[at]list.ru)

Аннотация

Представлена имитационная модель распространения сигнала в системе подвижной радиосвязи, с помощью которой можно выбрать код коррекции ошибок в зависимости от полученного значения усредненной медианной мощности сигнала (УММС) на трассе распространения и тем самым повысить качество беспроводной связи. Имитационная модель состоит из двух частей. В первой части рассчитывается усредненная медианная мощность сигнала. Модель содержит в себе базу данных, в которую вносятся параметры реальной трассы распространения. Вторая часть имитационной модели рассчитывает зависимость вероятности битовой ошибки от битового отношения сигнал/шум для циклических, линейных или сверточных кодов с различными параметрами. Связь УММС с битовым отношением сигнал/шум позволяет определить для данной конкретной трассы распространения радиосигнала оптимальный по критерию максимума УММС код коррекции ошибок.

Ключевые слова: имитационная модель, радиосигнал, битовая ошибка, беспроводная связь, код коррекции ошибок.

A SIMULATION MODEL OF SIGNAL PROPAGATION IN A MOBILE RADIO COMMUNICATION SYSTEM WITH ERROR CORRECTING CODE SELECTION

Research article

Chernetsova E.A.^{1,*}¹ORCID : 0000-0001-5805-3111;¹Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (chernetsova[at]list.ru)

Abstract

A simulation model of signal propagation in a mobile radio communication system is presented, which can be used to select an error correcting code based on the measured value of the average median signal power (AMSP) along the propagation path, thereby improving the quality of wireless communication. The simulation model consists of two parts. In the first part, the average median signal power is calculated. The model contains a database into which the parameters of the actual propagation path are entered. The second part of the simulation model computes the dependence of the bit error probability on the signal-to-noise ratio for cyclic, linear, or convolutional codes with various parameters. The relationship between the AMSP and the signal-to-noise ratio allows one to determine the optimal error-correcting code for a given specific radio signal propagation path based on the criterion of maximum AMSP.

Keywords: simulation model, radio signal, bit error, wireless communication, error-correcting code.

Введение

В настоящее время в литературе применение моделей распространения радиоволн обосновывается для планирования сетей радиосвязи с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР) [1], автоматизации процесса размещения базовых станций [2], выработки методов увеличения зоны покрытия сетей без потери качества связи [3], [4], улучшения электромагнитной совместимости станций беспроводной связи [5], а также повышения их электромагнитной безопасности [6].

Ненаправляемые каналы связи очень подвержены влиянию окружающей среды. Разработанные в настоящее время модели распространения радиоволн (РРВ), как указывается в [7], позволяют оценить потери мощности сигнала в зависимости от расстояния между базовой и абонентской станциями (БС и АС соответственно), типа среды распространения, рабочей частоты, высот расположения антенн БС и АС. Также, обладая информацией о параметрах передатчика (мощность излучения, потери в антенно-фидерном тракте (АФТ), коэффициент усиления антенны) и приемника (коэффициент усиления антенны, потери в АФТ, чувствительность) и используя модели РРВ можно рассчитать, в том числе, теоретическую дальность связи и зону покрытия БС. Однако все модели имеют вероятностный характер и могут только в общих чертах оценить поведение сигнала в данном конкретном канале связи. Поэтому проблема повышения качества радиосвязи в данном конкретном канале остается актуальной. В работе [8] также указывается, что, поскольку известные модели не учитывают помеховую обстановку на данной конкретной трассе распространения, ландшафт подстилающей поверхности и препятствия на пути прохождения сигнала, то

актуальной задачей является разработка собственной модели распространения радиоволн для данной трассы распространения сигнала.

Целью данной работы является разработка имитационной модели распространения сигнала в системе подвижной радиосвязи, с помощью которой можно выбрать код коррекции ошибок в зависимости от полученного значения усредненной медианной мощности сигнала (УММС) на трассе распространения и тем самым повысить качество беспроводной связи. Для достижения указанной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Разрабатывается программная модель распространения радиоволн по данной трассе распространения для расчета усредненной медианной мощности сигнала (УММС). Практическая значимость программной модели заключается в наличии базы данных поправочных коэффициентов для расчета слагаемых затухания сигнала, значения которых могут изменяться и корректироваться для любой новой трассы распространения сигнала.

2. Производится привязка полученного значения УММС к битовому отношению сигнал/шум в канале связи и вычисляется вероятность битовой ошибки.

3. На основании результатов работы имитационных моделей кодов коррекции ошибок в канале связи с белым гауссовским шумом производится выбор кода коррекции ошибок для сигнала по критерию обеспечения минимальной битовой ошибки.

Новизна разработанной имитационной модели заключается в добавлении влияния различных кодов коррекции ошибок и их различных параметров, что позволяет теоретически предсказать качество связи в данном конкретном радиоканале. Результаты моделирования показывают, что принятие решения по применению того или иного кода коррекции ошибок в данном конкретном канале связи может быть практически автоматизировано.

Методы и принципы исследования

Для того чтобы с хорошим или отличным качеством принимать сигнал в зоне обслуживания БС, необходимо выбрать энергетические параметры сигнала МС таким образом, чтобы затухание на трассе распространения сигнала не являлось критичным. Различный рельеф местности в зоне ответственности БС, как указывается в [9], оказывает влияние на уровни сигнала. Поэтому в системах радиосвязи путем усреднения по двум параметрам: по времени и расположению (по числу точек приема) определяют усредненную медианную мощность сигнала (УММС). УММС представляет собой такое значение, которое не превышает 50% времени наблюдения и в 50% точек приема, находящихся на расстоянии r от передающей станции [10]:

$$P_{AM}(r, T = 50\%, L = 50\%) = P_{AM}(r, 50, 50) = P_{AM} \quad (1)$$

где P_{AM} — усредненная медианная мощность сигнала;

T — время наблюдения;

L — ослабление сигнала.

Мощность сигнала в каждой точке приема определяется по формуле [11] (в дБ):

$$P_R = P_T + \eta_{\phi T} + G_{AT} + F_{TP} + G_{AR} + \eta_{\phi R} [\text{дБ}] \quad (2)$$

Случайное слагаемое ослабления рассчитывается по формуле

$$F_{TP} = F_{CB} + F_p + \Delta F_p + \Delta F_A + \Delta F_3 [\text{дБ}] \quad (3)$$

Слагаемые, входящие в уравнение (3) также выражаются в децибелах и обозначают:

F_{CB} — ослабление энергии радиоволн; F_p — потери в почве равнинной поверхности при нормальной атмосферной рефракции волн; ΔF_p — дополнительные потери из-за неровностей рельефа местности; ΔF_A — дополнительные потери при расположении радиостанций в лесистой местности; ΔF_3 — дополнительные потери из-за возможных замираний на трассе.

Уравнение (3) не может быть решено алгебраически, поскольку из всех входящих в него слагаемых только множитель ослабления сигнала в свободном пространстве может быть найден алгебраически по формуле:

$$F_{CB} = 20 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi d_{TP}} \right) \quad (4)$$

где λ — длина волны;

d_{TP} — протяженность трассы связи

Все зависимости слагаемых уравнения (3) от параметров трассы распространения сигнала и характеристик самого радиосигнала нужно находить при обследовании зоны ответственности БС эмпирически.

Так, например, слагаемое F_p зависит от протяженности трассы распространения сигнала d_{TP} , частоты сигнала f_0 , высоты подъема антенны h_A и электрических параметров почвы — диэлектрической постоянной ϵ и удельной проводимости σ ($1/\text{Ом}\cdot\text{м}$) местности при любых почвах.

Слагаемое ΔF_p называется вероятностью по местоположению корреспондентов и определяется вероятностными методами. Оно может быть найдено как зависимость $P\% = \varphi \Delta F_p$, где величина $P\%$ соответствует проценту точек на трассе распространения, в которых обеспечивается прием сигналов на заданном удалении от передающей станции с достоверностью не хуже требуемой. При $P=50\%$ множитель $\Delta F_p=0$; при гарантированной повышенной вероятности ($P>50\%$) дополнительные потери учитываются обязательно [12].

Потери ΔF_A учитываются в том случае, когда станции находятся не на открытой местности, а в лесистой [13]. По экспериментальным данным при размещении только одной станции в лиственном лесу $\Delta F_A = -(8...10)$ дБ, а зимой или в хвойном лесу $\Delta F_A = -(4...5)$ дБ. Если обе станции (БС и МС) развернуты в лесу, то значение ΔF_A удваивается.

На закрытых трассах большой протяженности ($d_{\text{тр}} > 30$ км.) замирание сигнала учитывается с помощью слагаемого ΔF_3 . Эмпирически находятся зависимости $\Delta F_3(f_0, d_{\text{тр}}, \gamma_c)$, где величина γ_c характеризует долю времени суток в процентах, для которой на частоте f_0 потери за счет замираний составляют определенную величину ΔF_3 .

Если, исходя из заданной достоверности связи, известна минимальная принимаемая мощность P_{Rmin} , то условием качественного приема сигналов с учетом выражения (1) будет

$$P_R \geq P_{R \text{ min}} \quad (5)$$

Найденную величину P_{AM} далее можно связать с величиной битового отношения сигнал/шум по формуле:

$$E_{\text{бит}} / N_0 = \frac{P_{\text{AM}}}{N(\omega)}$$

где $N(\omega) = 10 \lg \left(\frac{f_{\text{BW}}}{f_s} \right)^3$ — мощность шума на выходе приемника;

f_{BW} — полоса частот выходного сигнала

f_s — частота дискретизации;

Битовое отношение сигнал/шум, в свою очередь, связано с вероятностью битовой ошибки $P_{\text{ош}}$ [14], которая является критерием качества связи для беспроводных систем.

Таким образом, построив зависимости $P_{\text{ош}} = f(E_{\text{бит}}/N_0)$ для различных кодов коррекции ошибок и их параметров, можно определить оптимальный код коррекции ошибок по критерию максимального УММС.

Основные результаты

Для расчёта УММС в пакете прикладных программ Matlab [15] была разработана программа, интерфейс которой представлен на рисунке 1. На рисунке 2 представлен вид полученного результата — величина УММС в дБ.

Рисунок 1 - Интерфейс программы для расчета УММС

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.38.1>

Рисунок 2 - Вид полученного результата – значение УММС в дБ

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.38.2>

Для расчета используются модели Окамура, Окамура-Хата и Ли [16], а также Рекомендация МСЭ-R P.1546-6 «Метод прогнозирования для трасс связи пункта с зоной для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 4000 МГц» [17].

В результате работы программы получается значение усредненной медианной мощности сигнала P_{AM} . Затем с помощью имитационных моделей, реализованных в пакете Simulink Matlab и представленных на рисунках 3–5,

производится сравнение эффективности кодирования в системах беспроводной радиосвязи с бинарной фазовой манипуляцией (BPSK) [18]. Для различных видов кодов коррекции ошибок (линейных, циклических, сверточных) и различных параметров кодов (количество входных символов, количество выходных символов, для сверточного кода вектор длин кодовых ограничений ветвей) получаются зависимости вероятности битовой ошибки $R_{бит}$ от битового отношения сигнал/шум Ебит/ N_0 (рис. 6, 7).

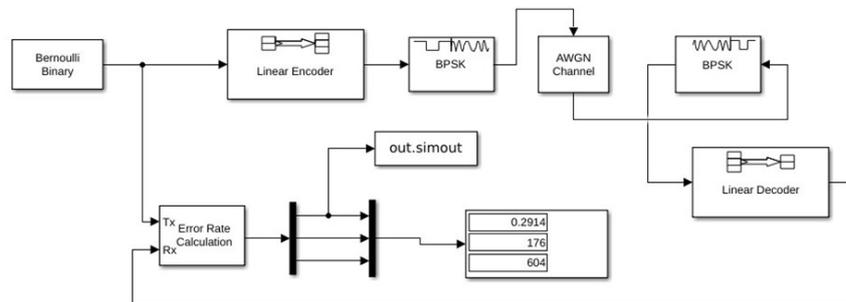


Рисунок 3 - Имитационная модель радиоканала с использованием линейного кода коррекции ошибок
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.38.3>

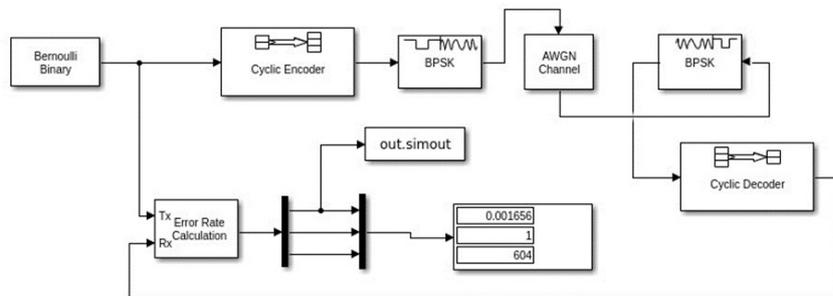


Рисунок 4 - Имитационная модель радиоканала с использованием циклического кода коррекции ошибок
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.38.4>

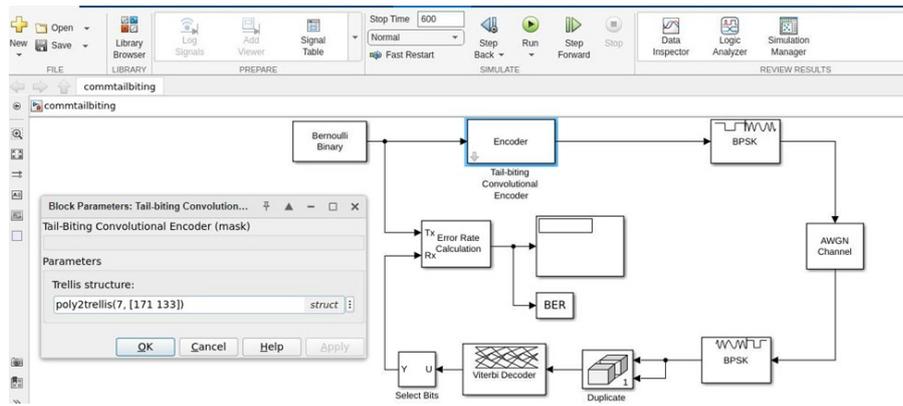
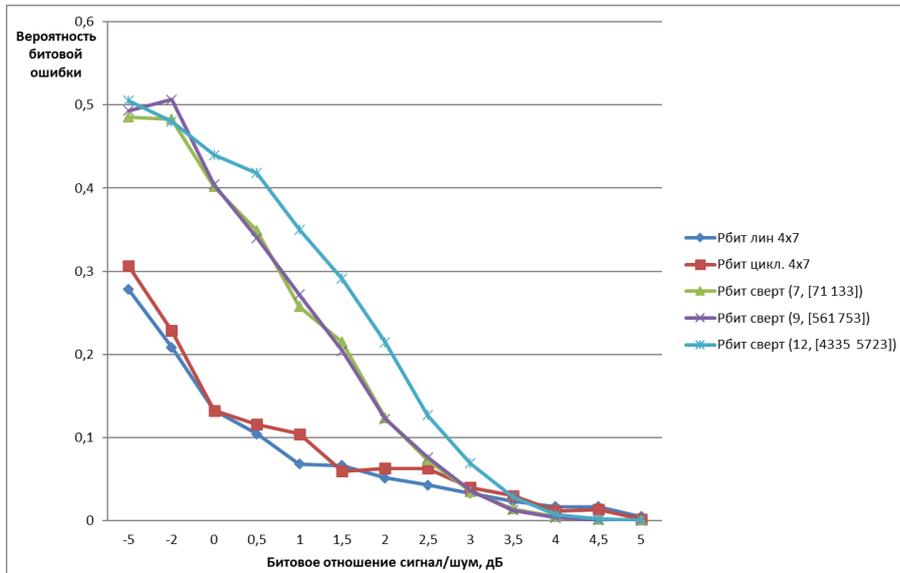


Рисунок 5 - Имитационная модель радиоканала с использованием сверточного кода коррекции ошибок, показаны параметры кода

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.38.5>

Рисунок 6 - Зависимость вероятности битовой ошибки от битового отношения сигнал/шум для разных типов кодов и их параметров

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.38.6>



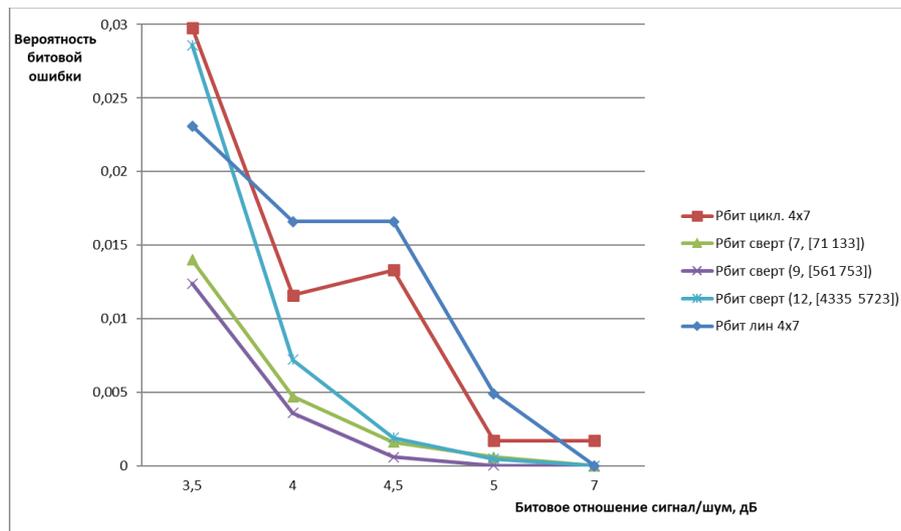


Рисунок 7 - Зависимость вероятности битовой ошибки от битового отношения сигнал/шум для разных типов кодов и их параметров (детализация)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.38.7>

Заключение

Отличительной особенностью представленной в данной работе программной модели расчета УММС по сравнению с аналогичными программами, например [19], [20], [21], является наличие баз данных, в которые вносятся числовые зависимости параметров затухания, и которые можно подключить при программном расчете затухания радиосигнала при его распространении по трассе. Поэтому при обследовании реальной зоны ответственности БС можно либо обновить базу данных и внести в нее реальные параметры затухания, либо создать новую базу данных для подключения к программе.

Из полученной с помощью имитационного моделирования зависимости вероятности битовой ошибки $P_{\text{бит}}$ от битового отношения сигнал/шум $E_{\text{бит}}/N_0$ в дБ для трех типов кодов коррекции ошибок в радиоканале с бинарной фазовой модуляцией (рис. 6) можно видеть, что при отрицательных значениях $E_{\text{бит}}/N_0$ линейный код имеет преимущество по значениям вероятности битовой ошибки перед другими видами кодов, однако при положительных значениях $E_{\text{бит}}/N_0$ (рис. 7) выявляются преимущества сверточных кодов коррекции ошибок, так как при одном и том же битовом отношении сигнал/шум они способны обеспечить меньшую вероятность битовой ошибки по сравнению с циклическим или линейным кодом. Сравнение трех сверточных кодов с различными значениями кодового ограничения показывает, что наиболее эффективным в смысле коррекции ошибок в данной конкретной конфигурации системы идентификации является сверточный код с кодовым ограничением, равным 9.

Оптимальный по критерию максимального УММС код коррекции ошибок можно определить с использованием связи значения УММС от битового отношения сигнал/шум.

Представленные в работе результаты имитационного моделирования показывают, что данный метод повышения качества беспроводной подвижной связи может быть автоматизирован при условии обследования зоны ответственности системы связи.

По сравнению с результатами, полученными в работах [22], [23] представленная модель может быть применена для трассы распространения радиосигнала любого профиля и любой помеховой обстановки.

Научная новизна результатов, полученных автором, заключается в доказательстве возможности автоматизации выбора кода коррекции ошибок, оптимального по критерию усредненной медианной мощности сигнала при применении на любой трассе распространения радиосигнала. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности повысить качество связи на любой трассе распространения радиосигнала.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.38.8>

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.38.8>

Список литературы / References

1. Бельшева В.С. Умный стандарт: революция в современных технологиях / В.С. Бельшева, Е.А. Кузьминых // Научная весна – 2025. Технические науки : сборник научных трудов. — Шахты : Донской государственный технический университет, 2025. — С. 13–23.



2. Иванов В.С. Алгоритм автоматического размещения базовых станций транкинговых систем связи / В.С. Иванов, С.У. Увайсов, И.А. Иванов // Труды учебных заведений связи. — 2023. — Т. 9. — № 5. — С. 25–34.
3. Алецкая В.А. Модернизация системы сотовой связи в городе Светлогорске на основе сети пятого поколения / В.А. Алецкая // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. — 2022. — № 1. — С. 5–13.
4. Мартынова А.Н. Особенности модернизации сети связи и передачи данных в интересах МВД России по Воронежской области / А.Н. Мартынова // Актуальные вопросы эксплуатации систем охранного мониторинга и защищенных телекоммуникационных систем : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. — Воронеж : Воронежский институт МВД РФ, 2024. — С. 125–126.
5. Макарова Е.Г. Электромагнитная совместимость станций слежения с радиоэлектронными системами беспроводного доступа в полосе частот 3400-3600 МГц / Е.Г. Макарова, Е.Д. Штрафина // Инновационные технологии : сборник научных статей по материалам 8-й Международной научно-технической конференции. — Бургас : Институт гуманитарных наук, экономики и информационных технологий, 2025. — С. 33–39.
6. Стаценко Л.Г. Оценка электромагнитного загрязнения при модернизации сотовых сетей связи города Владивостока / Л.Г. Стаценко, А.А. Бахвалова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. — 2021. — № 4 (82). — С. 39–47.
7. Андреев Р.А. Анализ применимости известных моделей распространения радиоволн для технологии LoRa / Р.А. Андреев, А.А. Прасолов, А.С. Федоров // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : сборник научных трудов XI Международной научно-технической и научно-методической конференции : в 4 т. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2022. — Т. 3. — С. 13–17.
8. Прасолов А.А. Анализ применимости и сравнение известных моделей распространения радиоволн с результатами радиоизмерений технологии LoRa / А.А. Прасолов, А.С. Федоров // Экономика и качество систем связи. — 2024. — № 3 (33). — С. 40–56.
9. Мамченко М.В. Эмпирическая модель расчета затухания сигнала с учетом коэффициента застройки местности для беспилотных транспортных средств / М.В. Мамченко, В.А. Зорин, М.А. Романова // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. — 2022. — № 1 (105). — С. 59–73.
10. Федоров С.М. Системы и сети связи с подвижными объектами / С.М. Федоров, И.А. Черноиваненко. — Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2021. — 86 с.
11. Сулимов А.И. Физическое моделирование контролируемой многолучевой среды распространения радиоволн / А.И. Сулимов, А.А. Галиев, Р.Р. Латыпов [и др.] // Радиотехника и электроника. — 2024. — Т. 69. — № 6. — С. 562–573.
12. Бурков С.М. Оценка использования технологии GSM на лесных территориях и автодорогах со сложным рельефом местности / С.М. Бурков, Д.В. Вегера, В.Н. Власов [и др.] // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. — 2022. — № 1. — С. 33–42.
13. Левкулич О.В. Распространение радиоволн в лесу / О.В. Левкулич, Л.А. Пантिलеев // Проблемные вопросы моделирования систем и процессов : материалы Всероссийской научно-практической конференции. — Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2024. — С. 653–659.
14. Звонарев В.В. Расчет вероятности битовой ошибки при некогерентном приёме сигнала с четырёхпозиционной относительной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи / В.В. Звонарев, А.В. Питрин, А.С. Попов // Труды МАИ. — 2024. — № 135. — С. 1–23.
15. Чернецова Е.А. Программа расчета уровня сигнала в системе подвижной радиосвязи / Е.А. Чернецова, А.А. Белов // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2025. — № 4 (52). — С. 114–120.
16. Попов А.Н. Анализ моделей и алгоритмов беспроводных радиоканалов широкополосной связи для решения задач безэкипажного судовождения в зоне ответственности системы управления движением судов порта Новороссийск / А.Н. Попов, Е.Р. Пакшина, А.А. Колесников // Морские интеллектуальные технологии. — 2025. — № 1–1 (67). — С. 272–281.
17. Рекомендация МСЭ-R P.1546-6. Метод прогнозирования для трасс связи пункта с зоной для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 4000 МГц. — 2019. — URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1546-6-201908-I/en> (дата обращения: 15.03.2026).
18. Чернецова Е.А. Сравнение эффективности кодирования в системе UHF RFID с помощью имитационного моделирования / Е.А. Чернецова, В.С. Онучин // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2025. — № 4 (52). — С. 120–128.
19. Онлайн-калькулятор теоретически достижимой дальности связи по различным методикам прогнозирования распространения радиоволн. — URL: <https://r1ban.ru/calc/loss-calc-dist.htm> (дата обращения: 15.03.2026).
20. Онлайн-калькулятор дальности радиосвязи. — URL: <https://radioskot.ru/calc/kalkulyator-dalnosti-radiosvyazi> (дата обращения: 15.03.2026).
21. Расчет дальности радиосвязи. — URL: <https://argut.net/konstruktorom-dalnosti-radiosvyazi/> (дата обращения: 15.03.2026).
22. Бадашев С.А. Разработка и внедрение модели распространения радиоволн, учитывающей сезонные особенности, в ПО RPLS Omega (комплекс автоматизированного проектирования) / С.А. Бадашев, О.Н. Пищин // Информационные технологии и технические средства управления (ICCT-2023) : материалы VII Международной научной конференции. — Москва : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2023. — С. 321–322.

23. Пищин О.Н. Модели расчета распределения уровня мощности электромагнитного поля в системах подвижной радиосвязи для малых дистанций в летний период / О.Н. Пищин, Д.С. Пузанков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2024. — № 2. — С. 111–119.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Belysheva V.S. Umnyj standart: revolyuciya v sovremennyh tekhnologiyah [Smart Standard: A Revolution in Modern Technologies] / V.S. Belysheva, E.A. Kuzminykh // Nauchnaya vesna – 2025. Tekhnicheskie nauki [Scientific Spring – 2025. Technical Sciences] : collection of scientific papers. — Shakhty : Don State Technical University, 2025. — P. 13–23. [in Russian]
2. Ivanov V.S. Algoritm avtomaticheskogo razmeshcheniya bazovyh stancij trunkingovyh sistem svyazi [Automatic Placement Algorithm of Base Stations Trunking Communication Systems] / V.S. Ivanov, S.U. Uvajsov, I.A. Ivanov // Trudy uchebnyh zavedenij svyazi [Proceedings of Telecommunication Universities]. — 2023. — Vol. 9. — № 5. — P. 25–34. [in Russian]
3. Aletskaya V.A. Modernizaciya sistemy sotovoj svyazi v gorode Svetlogorske na osnove seti pyatogo pokoleniya [Modernization of the Cellular Communication System in the City of Svetlogorsk Based on the Fifth Generation Network] / V.A. Aletskaya // Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki [Vestnik IKBFU. Physics, Mathematics, and Technology]. — 2022. — № 1. — P. 5–13. [in Russian]
4. Martynova A.N. Osobennosti modernizacii seti svyazi i peredachi dannyh v interesah MVD Rossii po Voronezhskoj oblasti [Features of Modernizing the Communication and Data Transmission Network for the Benefit of the Ministry of Internal Affairs of Russia for the Voronezh Region] / A.N. Martynova // Aktual'nye voprosy ekspluatcii sistem ohrannogo monitoringa i zashchishchennyh telekommunikacionnyh sistem [Current Issues in the Operation of Security Monitoring Systems and Secure Telecommunication Systems] : collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. — Voronezh : Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, 2024. — P. 125–126. [in Russian]
5. Makarova E.G. Elektromagnitnaya sovместimost' stancij slezheniya s radioelektronnymi sistemami besprovodnogo dostupa v polose chastot 3400–3600 MGc [Electromagnetic Compatibility of Tracking Stations with Radio-Electronic Wireless Access Systems in the 3400–3600 MHz Frequency Band] / E.G. Makarova, E.D. Shtrafina // Innovacionnye tekhnologii [Innovative Technologies] : collection of scientific articles based on the materials of the 8th International Scientific and Technical Conference. — Burgas : Institute of Humanities, Economics and Information Technology, 2025. — P. 33–39. [in Russian]
6. Statsenko L.G. Ocenka elektromagnitnogo zagryazneniya pri modernizacii sotovyh setej svyazi goroda Vladivostoka [Assessment of Electromagnetic Contamination in Modernization of Cellular Communication Networks of Vladivostok] / L.G. Statsenko, A.A. Bakhvalova // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo [Issues of Modern Science and Practice. V.I. Vernadsky University]. — 2021. — № 4 (82). — P. 39–47. [in Russian]
7. Andreev R.A. Analiz primenimosti izvestnyh modelej rasprostraneniya radiovoln dlya tekhnologii LoRa [Analysis of the Applicability of Known Radio Wave Propagation Models for LoRa Technology] / R.A. Andreev, A.A. Prasolov, A.S. Fedorov // Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii [Current Problems of Infotelecommunications in Science and Education] : collection of scientific papers of the XI International Scientific, Technical and Methodological Conference : in 4 vol. — Saint Petersburg : The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, 2022. — Vol. 3. — P. 13–17. [in Russian]
8. Prasolov A.A. Analiz primenimosti i sravnenie izvestnyh modelej rasprostraneniya radiovoln s rezul'tatami radioizmerenij tekhnologii LoRa [Applicability Analysis and Comparison of Known Radio Propagation Models with LoRa Technology Radio Measurements Results] / A.A. Prasolov, A.S. Fedorov // Ekonomika i kachestvo sistem svyazi [Economics and Quality of Communication Systems]. — 2024. — № 3 (33). — P. 40–56. [in Russian]
9. Mamchenko M.V. Empiricheskaya model' rascheta zatuhaniya signala s uchetoм коэффициента застройки местности для беспилотных транспортных средств [Empirical Model for Propagation Loss Using Floor Space Index for Unmanned Vehicles] / M.V. Mamchenko, V.A. Zorin, M.A. Romanova // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN [News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. — 2022. — № 1 (105). — P. 59–73. [in Russian]
10. Fedorov S.M. Sistemy i seti svyazi s podvizhnymi ob'ektami [Communication Systems and Networks with Mobile Objects] / S.M. Fedorov, I.A. Chernovanenko. — Voronezh : Voronezh State Technical University, 2021. — 86 p. [in Russian]
11. Sulimov A.I. Fizicheskoe modelirovanie kontroliruemoj mnogoluchevoj sredy rasprostraneniya radiovoln [Physical Emulation of Controlled Multipath Radio Propagation Environment] / A.I. Sulimov, A.A. Galiev, R.R. Latypov [et al.] // Radiotekhnika i elektronika [Journal of Communications Technology and Electronics]. — 2024. — Vol. 69. — № 6. — P. 562–573. [in Russian]
12. Burkov S.M. Ocenka ispol'zovaniya tekhnologii GSM na lesnyh territoriyah i avtodorogah so slozhnym rel'efom mestnosti [Evaluation of the Use of GSM Technology During Distribution in Forest Territories and Highways with Complex Terrain] / S.M. Burkov, D.V. Vegera, V.N. Vlasov [et al.] // Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie [Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis, Management]. — 2022. — № 1. — P. 33–42. [in Russian]
13. Levkulich O.V. Rasprostranenie radiovoln v lesu [Radio Wave Propagation in the Forest] / O.V. Levkulich, L.A. Pantileev // Problemnye voprosy modelirovaniya sistem i processov [Problematic Issues of Modeling Systems and Processes] : proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. — Voronezh : Voronezh State University of Forestry named after G.F. Morozov, 2024. — P. 653–659. [in Russian]



14. Zvonarev V.V. Raschet veroyatnosti bitovoj oshibki pri nekogerentnom priyome signala s chetyryohpozicionnoj otnositel'noj fazovoj manipulyaciej v prisutstvii garmonicheskoy pomekhi [Bit Error Probability Computing at Incorrect Signal with Binary Relative Phase Manipulation Reception in the Presence of Harmonic Interference] / V.V. Zvonarev, A.V. Pitrin, A.S. Popov // Trudy MAI [Proceedings of MAI]. — 2024. — № 135. — P. 1–23. [in Russian]
15. Chernetsova E.A. Programma rascheta urovnya signala v sisteme podvizhnoj radiosvyazi [A Program for Calculating the Signal Level in a Mobile Radio Communication System] / E.A. Chernetsova, A.A. Belov // Informacionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo [Information Technologies and Systems: Management, Economics, Transport, Law]. — 2025. — № 4 (52). — P. 114–120. [in Russian]
16. Popov A.N. Analiz modelej i algoritmov besprovodnyh radiokanalov shirokopolosnoj svyazi dlya resheniya zadach bezekipazhnogo sudovozhdeniya v zone otvetstvennosti sistemy upravleniya dvizheniem sudov porta Novorossiysk [Analysis of Models and Algorithms of Wireless Radio Channels of Broadband Communication for Solving the Tasks of Crewless Ship Navigation in the Area of Responsibility of the Port of Novorossiysk Vessel Traffic Control System] / A.N. Popov, E.R. Pakshina, A.A. Kolesnikov // Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine Intellectual Technologies]. — 2025. — № 1–1 (67). — P. 272–281. [in Russian]
17. Rekomendaciya MSE-R P.1546-6. Metod prognozirovaniya dlya trass svyazi punkta s zonoj dlya nazemnyh sluzhb v diapazone chastot ot 30 MGc do 4000 MGc [Recommendation ITU-R P.1546-6. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4000 MHz]. — 2019. — URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1546-6-201908-I/en> (accessed: 15.03.2026). [in Russian]
18. Chernetsova E.A. Sravnenie effektivnosti kodirovaniya v sisteme UHF RFID s pomoshch'yu imitacionnogo modelirovaniya [Comparison of the Coding Efficiency in the UHF RFID System Using Simulation Modeling] / E.A. Chernetsova, V.S. Onuchin // Informacionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo [Information Technologies and Systems: Management, Economics, Transport, Law]. — 2025. — № 4 (52). — P. 120–128. [in Russian]
19. Onlajn-kal'kulyator teoreticheski dostizhimoj dal'nosti svyazi po razlichnym metodikam prognozirovaniya rasprostraneniya radiovoln [Online calculator of theoretically achievable communication range using various methods of predicting radio wave propagation]. — URL: <https://r1ban.ru/calc/loss-calc-dist.htm> (accessed: 15.03.2026). [in Russian]
20. Onlajn-kal'kulyator dal'nosti radiosvyazi [Online radio communication range calculator]. — URL: <https://radioskot.ru/calc/kalkulyator-dalnosti-radiosvyazi> (accessed: 15.03.2026). [in Russian]
21. Raschet dal'nosti radiosvyazi [Calculation of the Radio Communication Range]. — URL: <https://argut.net/konstruktorom-dalnosti-radiosvyazi/> (accessed: 15.03.2026). [in Russian]
22. Badashev S.A. Razrabotka i vnedrenie modeli rasprostraneniya radiovoln, uchityvayushchej sezonnye osobennosti, v PO RPLS Onega (kompleks avtomatizirovannogo proektirovaniya) [Development and Implementation of a Radio Wave Propagation Model Taking into Account Seasonal Features in the RPLS Onega Software (Computer-Aided Design Complex)] / S.A. Badashev, O.N. Pishchin // Informacionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva upravleniya (ICCT-2023) [Information Technologies and Technical Means of Control (ICCT-2023)] : proceedings of the VII International Scientific Conference. — Moscow : Institute of Control Sciences RAS, 2023. — P. 321–322. [in Russian]
23. Pishchin O.N. Modeli rascheta raspredeleniya urovnya moshchnosti elektromagnitnogo polya v sistemah podvizhnoj radiosvyazi dlya malyh distancij v letnij period [Models for Calculating the Distribution of the Electromagnetic Field Power Level in Mobile Radio Communication Systems for Short Distances in Summer] / O.N. Pishchin, D.S. Puzankov // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics]. — 2024. — № 2. — P. 111–119. [in Russian]