

УДК 621.394.147

DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-107-115

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОЙ СИГНАЛЬНО-КОДОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ВОЕННОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ТРОПОСФЕРНОЙ СВЯЗИ**О. В. ШИДО, В. В. ПИСКУН***Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь», г. Минск*

Представлена имитационная модель комбинированной сигнально-кодовой конструкции военной цифровой системы тропосферной связи на основе каскадного и пространственно-временного кодирования в канале с релеевскими замираниями. По результатам моделирования для подтверждения адекватности модели с целью определения оптимальных структур и параметров комбинированной сигнально-кодовой конструкции путем структурно-параметрического синтеза проведено сравнение экспериментальных зависимостей вероятности битовой ошибки с теоретическими, полученными по ранее предложенной математической модели расчета и оценки помехоустойчивости комбинированных сигнально-кодowych конструкций.

Ключевые слова: помехоустойчивость, тропосферная связь, вероятность битовой ошибки, сигнально-кодковая конструкция.

Для цитирования. Шидо, О. В. Имитационная модель комбинированной сигнально-кодовой конструкции военной цифровой системы тропосферной связи / О. В. Шидо, В. В. Пискун // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 3 (102). – С. 107–115. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-107-115

SIMULATION MODEL OF A COMBINED SIGNAL-CODE DESIGN OF A MILITARY DIGITAL TROPOSPHERIC COMMUNICATION SYSTEM**O. V. SHIDO, V. V. PISKUN***Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk*

The article presents a simulation model of a combined signal-code design of a military digital tropospheric communication system based on cascade and space-time coding in a channel with Rayleigh fading. Based on the simulation results, in order to confirm the adequacy of the model in order to determine the optimal structures and parameters of the combined signal-code design by means of structural-parametric synthesis, a comparison of the experimental dependencies of the bit error probability with the theoretical ones obtained using the previously proposed mathematical model for calculating and assessing the noise immunity of combined signal-code designs was carried out.

Keywords: noise immunity, tropospheric communication, bit error probability, signal-code design.

For citation. Shido O. V., Piskun V. V. Simulation model of a combined signal-code design of a military digital tropospheric communication system. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 3 (102), pp. 107–115 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-107-115

Введение

На основе полученных в [1] теоретических результатов исследования комбинированных сигнально-кодowych конструкций (КСКК) военных цифровых систем тропосферной связи (ЦСТС) (рис. 1) была определена их высокая эффективность с точки зрения повышения показателей помехоустойчивости и энергетической эффективности ЦСТС в канале с релеевскими замираниями.

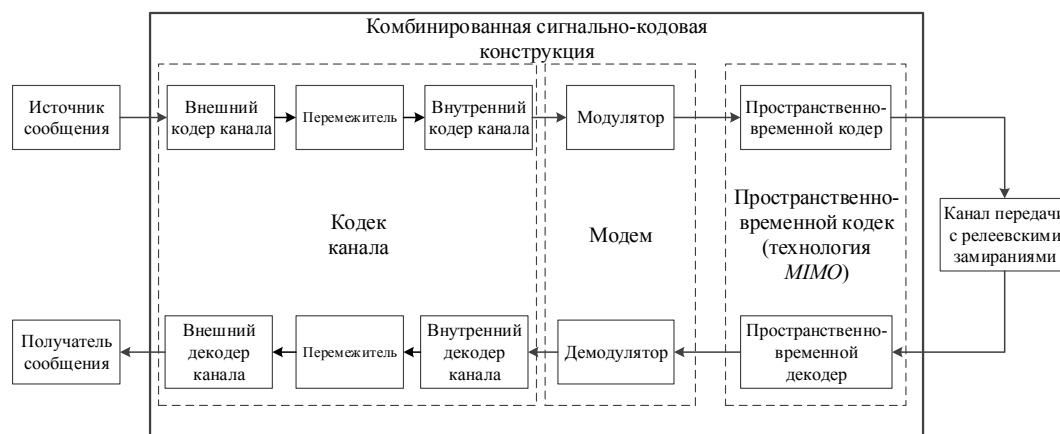


Рис. 1. Структурная схема комбинированной сигнально-кодовой конструкции военной цифровой системы тропосферной связи на основе каскадного и пространственно-временного кодирования

Целью настоящей работы является сравнение полученных результатов расчета и оценки помехоустойчивости и энергетической эффективности КСКК ЦСТС на основе математической модели, предложенной в [1], путем проведения имитационного моделирования данной системы.

Основная часть

Перед тем как непосредственно перейти к имитационному моделированию, необходимо обосновать выбранную информационную технологию и среду моделирования, которая используется в нашем исследовании. Для этого следует произвести краткий обзор существующих программных продуктов, имеющих возможность моделирования различных систем связи.

Выбор современной информационной технологии и среды моделирования

При моделировании систем связи могут быть использованы различные среды и методологии разработки сложных систем. Разные средства спецификации анализа результатов позволяют строить модели, имитирующие практически любой реальный процесс, выполнить анализ моделей на компьютере без проведения реальных экспериментов.

Для моделирования систем связи существует множество программных средств, которые обладают разными возможностями. Кратко рассмотрены возможности основных инструментов для исследования моделей – сред моделирования SystemView, LabVIEW, MATLAB. Особое место среди разработок компьютерных моделей систем связи занимает среда моделирования MATLAB + Simulink.

В качестве мощного и удобного средства анализа радиотехнических средств применяют пакет SystemView, который обеспечивает возможность всестороннего анализа свойств систем, включая алгоритмы аналоговой и цифровой обработки сигналов, синтеза фильтров, анализа и синтеза систем управления и систем связи. Пакет SystemView осуществляет моделирование динамических систем на уровне функциональных блоков. Открытая архитектура пакета позволяет пользователям и разработчикам выпускать собственные дополнения и подключать их в виде динамических библиотек. Пользовательский интерфейс программы достаточно прост в использовании и интуитивно понятен.

Основу пакета составляет базовый модуль SystemView Professional Edition, к которому подключаются различные специализированные библиотеки [2, 3]:

- Communications Library – содержит модели каналов, кодеров и декодеров, модуляторов и демодуляторов;
- DSP Library – предназначена для моделирования цифровых сигнальных процессоров, в том числе содержит прототипы для реализации ПЛИС;
- RF/Analog Library – содержит модели различных радиотехнических устройств трактов аналоговой обработки сигналов;
- Logic Library – библиотека цифровых логических схем;
- CDMA/PCS Library – включает модели устройств, используемых в современных системах персональной связи, в том числе и с кодовым разделением каналов;
- Digital Video Broadcasting (DVB) Library – объединяет модели функциональных блоков, применяемых в аппаратуре цифрового телевизионного вещания;
- EnTegra Adaptive Filter Library – библиотека компонентов адаптивных фильтров.

Программная среда LabVIEW представляет собой высокоэффективную среду графического программирования. Широкие функциональные возможности среды LabVIEW позволяют использовать ее в практической работе обучаемому, инженеру и научному работнику. Интуитивно понятный процесс графического программирования дает возможность специалисту уделять больше внимания решению самой проблемы, а не процессу программирования.

Особенности среды LabVIEW состоят в следующем [2, 3]:

- функционально полный язык графического программирования, который создает программу в форме наглядной графической блок-схемы, традиционно используемой радиоинженерами;
- встроенные программные средства для сбора данных, управления приборами и оборудованием, обработки сигналов и экспериментальных данных, генерации отчетов, передачи и приема данных и т. д.;
- мощное математическое обеспечение, возможность интеграции программ, написанных в среде математического пакета MATLAB;
- наличие более 2000 программ (драйверов), позволяющих сопрягать разработанную программу с разнообразными приборами и оборудованием различных фирм через стандартные интерфейсы;
- наличие большого количества шаблонов приложений, а также свыше 1000 примеров, которые помогают быстро создавать собственные программы, внося в них небольшие коррективы;
- высокая скорость выполнения откомпилированных программ.

В LabView используются модуляторы/демодуляторы вида QAM, PSK, FSK. Вид помехозащищенных кодов: код Галлея, код Рида–Соломона (РС), сверточное кодирование (СК), код Боуза–Чаудхури–Хоквингема (БЧХ) [2, 3].

Одним из самых распространенных средств для моделирования различных сложных систем, в том числе систем связи, является программная среда MATLAB. Simulink – важная составная часть среды MATLAB. Пакет MATLAB/Simulink применяется для моделирования, имитации и анализа динамических систем. С его помощью можно строить графические блок-схемы, исследовать работоспособность систем, выявлять ошибки, исправлять недостатки.

Основу для моделирования различных систем связи составляет пакет Communications Toolbox – один из самых крупных пакетов среды моделирования Simulink. Пакет представлен обширным набором моделей, включающих в себя описания важнейших коммуникационных (телекоммуникационных) элементов: источников сигналов с различными законами распределения, квантователей, канальных кодеков,

модуляторов, демодуляторов, виртуальных устройств индикации и многих других устройств. Для проведения имитационного моделирования цифровых систем связи пакет Communication Toolbox содержит основные необходимые библиотеки (подбиблиотеки), показанные на рис. 2 [2, 3].

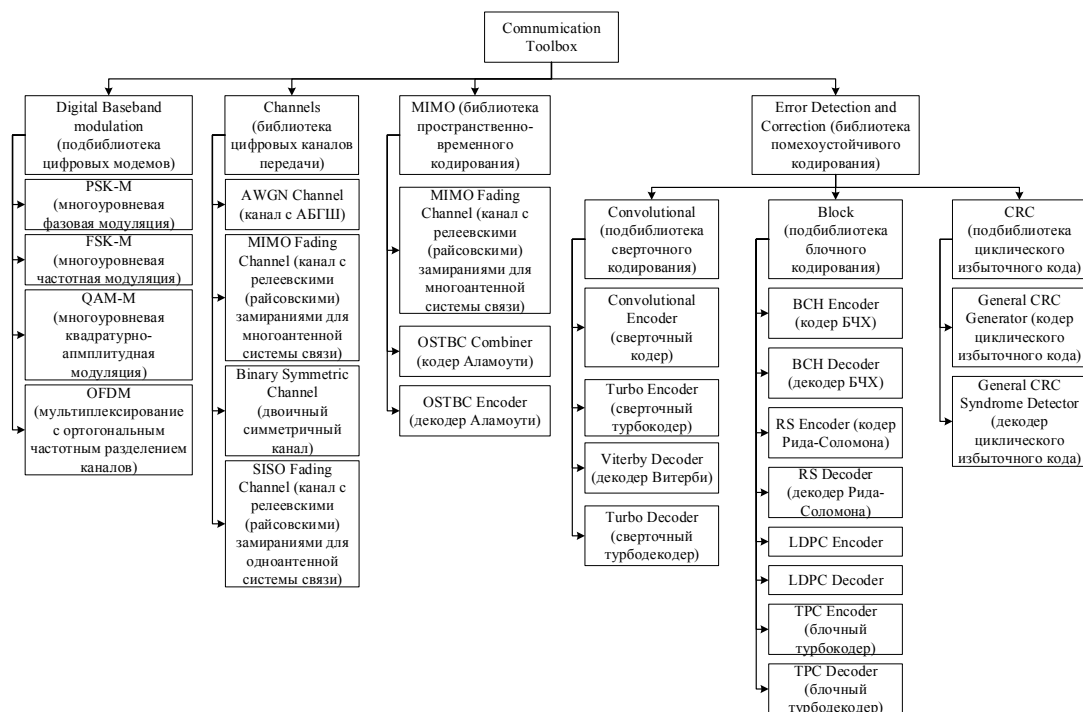


Рис. 2. Основные библиотеки (подбиблиотеки) пакета Communication Toolbox для имитационного моделирования цифровых систем связи

Как видно из краткого обзора существующих программных продуктов, имеющих возможность моделирования различных систем связи, у программной среды MATLAB/Simulink есть ряд преимуществ, одним из которых является обширный набор видов цифровой и аналоговой модуляции, помехоустойчивого и пространственно-временного кодирования, а также различных типов цифровых каналов передачи.

Далее в работе для проведения имитационного моделирования комбинированной сигнально-кодовой конструкции военной цифровой системы тропосферной связи на основе каскадного и пространственно-временного кодирования в канале с релейскими замираниями будет применяться программная среда MATLAB/Simulink, а именно – пакет Communications Toolbox.

Имитационная модель комбинированной сигнально-кодовой конструкции военной цифровой системы тропосферной связи

Структурная схема имитационной модели комбинированной сигнально-кодовой конструкции военной цифровой системы тропосферной связи на основе каскадного и пространственно-временного кодирования в канале с релейскими замираниями представлена на рис. 3.

Источник случайной последовательности вырабатывает цифровой сигнал, который затем поступает на вход каскадного кодера на основе сверточного кодирования и кода Рида–Соломона. После этого информационный сигнал поступает на модулятор QPSK, в котором происходит процесс преобразования одного или нескольких информационных параметров несущего сигнала в соответствии с мгновенными значениями информационного сигнала. Далее сигнал поступает на схему Аламоути.

Схема Аламоути является простой, но содержит весьма эффективный комплекс ортогонального пространственно-временного кодирования. Пространственно-временная матрица, соответствующая схеме Аламоути, имеет вид [4, 5]:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где x_1 (x_1^*) и x_2 (x_2^*) – комплексные информационные символы.

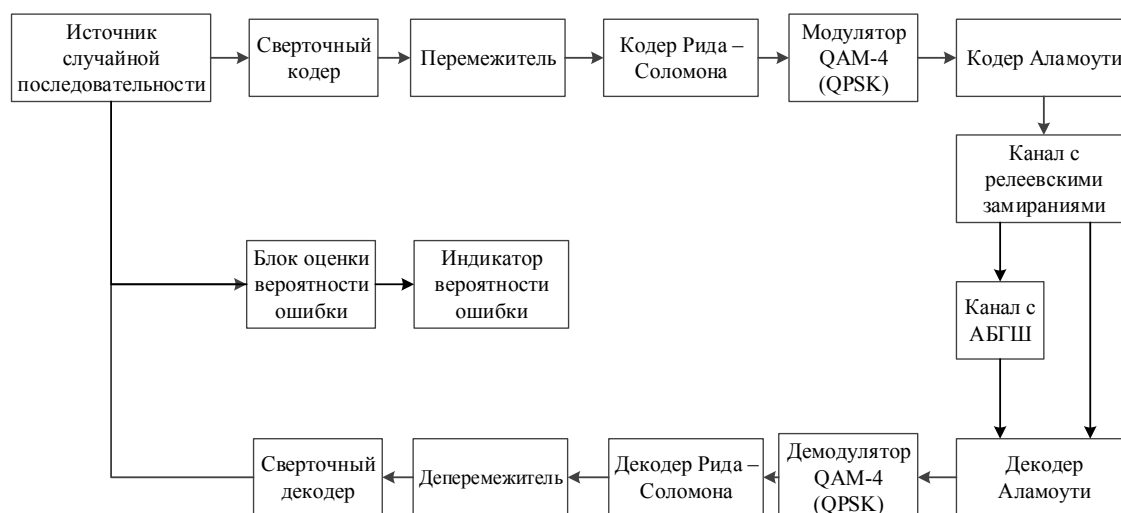


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели комбинированной сигнально-кодовой конструкции военной цифровой системы тропосферной связи на основе каскадного и пространственно-временного кодирования в канале с релеевскими замираниями

Структурная схема пространственно-временного кодера, использующего схему Аламоути, приведена на рис. 4 [4, 5]. На каждом временном интервале два комплексных информационных символа x_1 и x_2 одновременно передаются через антенны 1 и 2. На первом временном интервале символ x_1 передается через антенну 1 и одновременно символ x_2 передается через антенну 2. На втором временном интервале символ $-x_2^*$ передается через антенну 1, и одновременно символ x_1^* передается через антенну 2. Далее процесс передачи следующих символов повторяется.

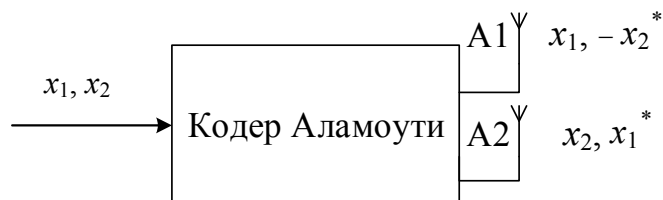


Рис. 4. Структурная схема пространственно-временного кодера Аламоути

В схеме Аламоути происходит пространственно-временное кодирование информационного сигнала для передачи его по каналу с релеевскими замираниями, к которому, в свою очередь, добавляется белый гауссовский шум в блоке канала с аддитив-

ным белым гауссовским шумом (АБГШ). Математическая модель сигнала на входе декодера Аламоути имеет вид [6, 7]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

где $\mathbf{y}$ – вектор-столбец принимаемых сигналов размерности $M \times 1$; $\mathbf{H}$ – комплексная матрица радиоканала размерности $M \times N$; $\mathbf{s}$ – вектор-столбец информационных символов размерности $M \times 1$; $\mathbf{n}$ – случайный гауссовский вектор размерности $M \times 1$.

После прохождения сигналом канала передачи декодер Аламоути объединяет сигналы от обеих приемных антенн в единый поток для дальнейшей демодуляции. Декодирование происходит в два этапа. На первом этапе компоненты комплексных случайных гауссовских величин принимаются равными нулю и линейный приемник вычисляет оценочные значения принятых сигналов. Затем по методу максимального правдоподобия из множества принятых отсчетов выбирается тот, который минимизирует расстояние между ним и его оценочным значением [4]. После прохождения процедуры декодирования принятый сигнал поступает на блок оценки вероятности ошибки, имеющий два входа: один – для сигнала с блока случайного источника данных, второй вход – для сигнала с выхода декодера по алгоритму Витерби. Блок оценки вероятности сравнивает эти два сигнала и выдает количество принятых ошибок, количество неправильно принятых сигналов и вероятность ошибки. Для отображения этих результатов используется индикатор вероятности ошибок.

Результаты имитационного моделирования комбинированной сигнально-кодовой конструкции военной цифровой системы тропосферной связи

Для подтверждения полученных в [1] результатов математических расчетов помехоустойчивости и энергетической эффективности КСКК ЦСТС были выбраны параметры КСКК ЦСТС согласно таблице.

Результаты расчета зависимости вероятности битовой ошибки (BER) от отношения «сигнал/шум» (h_b^2) на основе [1] для выбранных параметров КСКК ЦСТС согласно таблице и результаты имитационного моделирования КСКК ЦСТС с теми же параметрами представлены на рис. 5–8. При расчетах значение коэффициента корреляции r принималось равным нулю для исключения влияния интерференционных замираний сигнала в лучах разнесения (расстояние между антеннами выбиралось больше, чем 10λ).

Параметры КСКК ЦСТС, используемые при имитационном моделировании

Тип КСКК	Скорость сверточного кодирования R	Длина кодового ограничения K	Порождающие многочлены	Свободное кодовое расстояние $d_{св}$	Длина блока N , байт	Количество информационных символов K , байт	Количество исправляемых ошибок T_n
СК 1/3 (7, 7, 5) + PC (15, 11) + SIMO 1×2	1/3	3	7, 7, 5	8	15	11	2
СК 1/2 (7, 5) + PC (15, 11) + MIMO 2×2	1/2	3	7, 5	5	15	11	2
СК 1/2 (7, 5) + PC (64, 48) + MISO 2×1	1/2	3	7, 5	5	64	48	8
СК 2/3 (7, 5, 7) + PC (120, 108) + MIMO 2×2	2/3	3	7, 5, 7	3	120	108	6

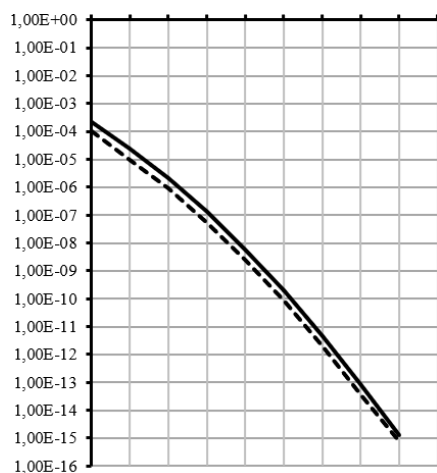


Рис. 5. Зависимость вероятности битовой ошибки (BER) от отношения «сигнал/шум» (h_b^2) для КСКК типа СК 1/3 (7, 7, 5) + РС (15, 11) + СИМО 1 × 2:
— — расчет; - - - моделирование

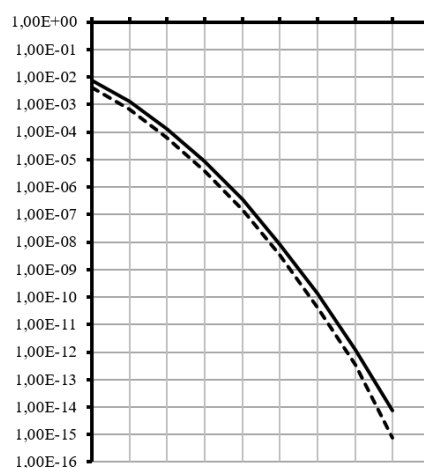


Рис. 6. Зависимость вероятности битовой ошибки (BER) от отношения «сигнал/шум» (h_b^2) для КСКК типа СК 1/2 (7, 5) + РС (15, 11) + МИМО 2 × 2:
— — расчет; - - - моделирование

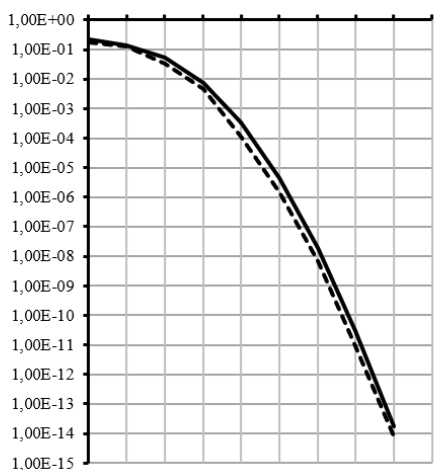


Рис. 7. Зависимость вероятности битовой ошибки (BER) от отношения «сигнал/шум» (h_b^2) для КСКК типа СК 1/2 (7, 5) + РС (64, 48) + МИМО 2 × 1:
— — расчет; - - - моделирование

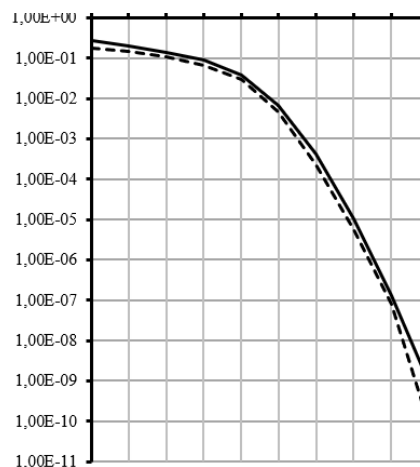


Рис. 8. Зависимость вероятности битовой ошибки (BER) от отношения «сигнал/шум» (h_b^2) для КСКК типа СК 2/3 (7, 5, 7) + РС (120, 108) + МИМО 2 × 2:
— — расчет; - - - моделирование

Исходя из рис. 5–8 видим, что имитационная модель адекватно описывает процесс работы КСКК ЦСТС в сравнении с полученными в [1] теоретическими результатами расчета и оценки показателей помехоустойчивости и энергетической эффективности. Данная модель является адекватной и не противоречит законам теории и практики в области цифровой обработки сигналов. В дальнейшем имитационная модель КСКК ЦСТС будет применяться при проведении структурно-параметрического синтеза КСКК с целью определения оптимальных параметров помехоустойчивого и пространственно-временного кодирования, а также цифровой модуляции в канале с переменными параметрами.

Заключение

Таким образом, рассмотрена имитационная модель комбинированной сигнально-кодовой конструкции военной цифровой системы тропосферной связи на основе пространственно-временного и помехоустойчивого кодирования в канале с релеевскими замираниями. По итогам имитационного моделирования произведено сравнение и анализ теоретических расчетов, полученных в [1], с экспериментальными результатами. В процессе данного сравнения и анализа подтверждена адекватность имитационной модели для дальнейшего ее применения при выполнении структурно-параметрического синтеза по определению оптимальных параметров и структуры КСКК ЦСТС.

Литература

1. Шидо, О. В. Результаты исследования эффективности применения комбинированных сигнально-кодовых конструкций военных цифровых систем тропосферной связи / О. В. Шидо, В. В. Пискун // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – 2025. – № 1 (86). – С. 118–125.
2. Очиллов, М. А. Особенности программного обеспечения для моделирования систем связи / М. А. Очиллов, А. М. Рахимов // Вестник науки и творчества. – 2017. – № 6 (18). – С. 28–31.
3. Михайлов, Д. Ю. Краткий обзор математического программного обеспечения / Д. Ю. Михайлов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 4. – С. 325–333.
4. Кренкель, Т. Э. Моделирование системы ММО с использованием Simulink / Т. Э. Кренкель, Э. С. Курашов // Т-Comm-Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9, № 8. – С. 21–25.
5. Аль Тахар Инас Ануар. Методы обработки принимаемых сигналов в системах связи с пространственно-временным разнесением : дис. ... канд. техн. наук : 2.2.15 / Аль Тахар Инас Ануар ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир, 2022. – 153 с.
6. Панкратов, Д. Ю. Компьютерное моделирование технологии ММО для систем радиосвязи / Д. Ю. Панкратов, А. Г. Степанова // Т-Comm-Телекоммуникации и транспорт. – 2018. – Т. 12, № 12. – С. 33–37. – DOI 10.24411/2072-8735-2018-10197
7. Панкратов, Д. Ю. Применение технологии ММО для улучшения характеристик физического уровня беспроводных сетей WI-FI / Д. Ю. Панкратов, А. В. Пахомова // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2024. – Т. 16, № 3. – С. 55–61. – DOI 10.36724/2409-5419-2024-16-3-55-61

References

1. Shido O. V., Piskun V. V. Results of the study of the efficiency of using combined signal-code constructions of a military digital tropospheric communication systems. *Vestnik Voennoi akademii Respubliki Belarus' = Bulletin of the Military Academy*, 2025, no. 1 (86), pp. 118–125 (in Russian).
2. Ochilov M. A., Rakhimov A. M. Features of software for modeling communication systems. *Vestnik nauki i tvorchestva = Bulletin of science and creativity*, 2017, no. 6 (18), pp. 28–31 (in Russian).
3. Mikhailov D. Yu. A brief overview of mathematical software. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical Sciences*, 2019, no. 4, pp. 325–333 (in Russian).
4. Krenkel T. E., Kurashov E. S. Simulation of MIMO system using SIMULINK. *T-Comm-Telekommunikatsii i transport*, 2015, vol. 9, no. 8, pp. 21–25 (in Russian).
5. Al' Takhar Inas Anuar. *Methods of processing received signals in space-time diversity communication systems*. Vladimir, 2022. 153 p. (in Russian).

6. Pankratov D. Y., Stepanova A. G. Computer simulation of MIMO technology for radio systems. *T-Comm-Telekommunikatsii i transport*, 2018, vol. 12, no. 12, pp. 33–37 (in Russian). DOI 10.24411/2072-8735-2018-10197
7. Pankratov D. Y., Pakhomova A. V. The use of MIMO technology to improve the physical layer characteristics of Wi – Fi. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = H&ES Reserch*, 2024, vol. 16, no. 3, pp. 55–61 (in Russian). DOI 10.36724/2409-5419-2024-16-3-55-61

Поступила 20.05.2025 г.