

Труды МАИ. 2025. № 142
Trudy MAI. 2025. No. 142. (In Russ.)

Научная статья
УДК 621.39; 004.056
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185109>
EDN: <https://www.elibrary.ru/KLXHCD>

СПОСОБ ДЕМОДУЛЯЦИИ БИОРТОГОНАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ С ДВОИЧНОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

**Алексей Николаевич Глушков¹, Павел Дмитриевич Коратаев²,
Кирилл Романович Частухин³, Марина Юрьевна Толстых^{4✉}**

^{1,2,3}Военно-учебный научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина», Воронеж, Россия

⁴Московский государственный лингвистический университет, Москва, Россия

⁴Московский университет МВД России им.В.Я. Кикотя, Москва, Россия

⁴marina_lion@mail.ru ✉

Аннотация. Целью работы является отыскание и научное обоснование новых способов повышения помехоустойчивости радиотехнических систем и комплексов связи. В ходе исследования предложен новый способ демодуляции двоичных фазоманипулированных биортогональных сигналов, представлена структурная схема реализующего его устройства, описан принцип работы устройства. Проведено моделирование функционирования разработанного устройства и получены характеристики помехоустойчивости. В разработанную структурную схему включен демодулятор биортогональных сигналов, состоящий из аналого-цифрового преобразователя, регистра сдвига, вычитателей, квадратурных каналов обработки,

сумматора, решающего устройства, устройства хранения и декодер. Функционирование устройства основано на последовательном запоминании отсчетов сигнала, вычислении откликов в квадратурных каналах, их суммировании и последующей демодуляции на основе сравнительного анализа биортогональных последовательностей. Для оценки эффективности метода проведено имитационное моделирование в MATLAB/Simulink. Полученные зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум показали соответствие теоретическим расчетам, что подтверждает адекватность предложенного подхода. Разработанный способ обеспечивает высокую помехоустойчивость демодулятора и может быть реализован в программируемых логических интегральных схемах с минимальными вычислительными затратами. В перспективе планируется сравнение предложенного метода с другими видами кодирования информации.

Ключевые слова: демодуляция, декодирование, цифровая обработка сигнала, аналого-цифровое преобразование, биортогональные последовательности

Для цитирования: Глушков А.Н., Коратаев П.Д., Частухин К.Р., Толстых М.Ю. Способ демодуляции биортогональных сигналов с двоичной фазовой манипуляцией // Труды МАИ. 2025. № 142. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185109>

Original article

METHOD FOR DEMODULATING BIORTHOGONAL SIGNALS WITH BINARY PHASE MANIPULATION

**Alexey N. Glushkov¹, Pavel D. Korataev², Kirill R. Chastukhin³,
Marina Yu. Tolstykh⁴✉**

^{1,2,3}Air force academy named after professor N.E. Zhukovskii and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russia

⁴Moscow State Linguistic University, Moscow, Russia

⁴Kikot Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Moscow, Russia

⁴marina_lion@mail.ru 

Abstract. The aim of the work is to find and scientifically substantiate new ways to increase the noise immunity of radio engineering systems and communication complexes. In the course of the study, a new method for demodulating binary phase-manipulated biorthogonal signals is proposed, a block diagram of the device implementing it is presented, and the principle of operation of the device is described. A simulation of the functioning of the developed device was carried out and noise immunity characteristics were obtained. The developed block diagram includes a biorthogonal signal demodulator consisting of an analog-to-digital converter, a shift register, subtractors, quadrature processing channels, an adder, a solver, a storage device and a decoder. The device's operation is based on sequential storage of signal samples, calculation of responses in quadrature channels, their summation and subsequent demodulation based on a comparative analysis of biorthogonal sequences. To evaluate the effectiveness of the method, simulation modeling was performed in MATLAB/Simulink. The obtained dependences of the error probability on the signal-to-noise ratio showed compliance with theoretical calculations, which confirms the adequacy of the proposed approach. The developed method provides high noise immunity of the demodulator and can be implemented in programmable logic integrated circuits with

minimal computational costs. In the future, it is planned to compare the proposed method with other types of information encoding.

Keywords: demodulation, decoding, digital signal processing, analog-to-digital conversion, biorthogonal sequences

For citation: Glushkov A.N., Korataev P.D., Chastukhin K.R., Tolstykh M.Yu. Method for demodulating biorthogonal signals with binary phase manipulation. *Trudy MAI*. 2025. No. 142. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185109>

Введение

Передающийся по беспроводному каналу данных информационный сигнал подвержен воздействию различных электромагнитных помех, в число которых входят аддитивный гауссовский белый шум, импульсные помехи, а также интерференция от радиотехнических систем, работающих в том же диапазоне частот. Тип передаваемых сообщений требует высокой помехоустойчивости канала связи к помехам [1], что обеспечивается с помощью канального кодирования [2, 3], включающего также методы коррекции ошибок и позволяющего повысить надежность приема и минимизировать вероятность ошибок в условиях воздействия помех и искажений.

Согласно классической схеме построения устройств приёма и обработки сигналов (рисунок 1) [4, 5], перед операцией дешифрирования в устройстве обработки сигналов происходит две операции принятия решений [6] о полученном символе – демодуляция и декодирование. Демодуляция отвечает за восстановление переданных

данных из принятого сигнала, а декодирование – за преобразование полученного кода в исходные данные с учетом коррекции возможных ошибок.

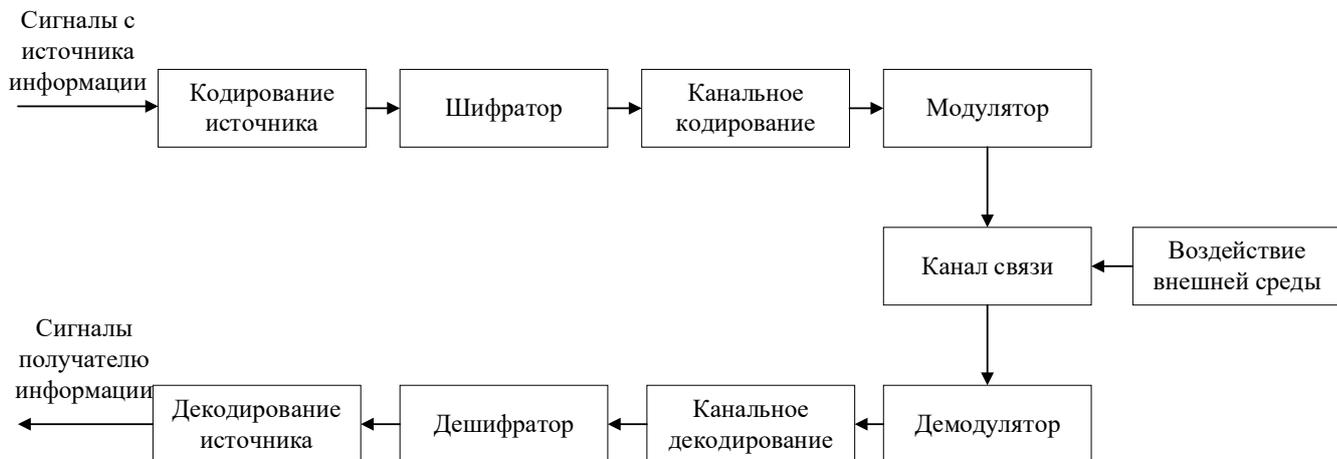


Рисунок 1 – Структурная схема классического канала связи

Наиболее помехоустойчивым видом манипуляции сигналов в системах связи является двоичная фазовая манипуляция (Binary Phase-Shift Keying (BPSK)) [7, 8]. Реализация BPSK проще, чем у многосимвольных модуляций (QPSK, 16-QAM и т. д.), что снижает вероятность аппаратных искажений, кроме того, демодулятор BPSK может работать с когерентной и некогерентной демодуляцией, что делает его более устойчивым в сложных условиях. В отличие от амплитудной манипуляции (ASK), которая сильно подвержена изменениям амплитуды из-за затухания сигнала, BPSK менее чувствительна к данным эффектам.

С целью увеличения помехоустойчивости современные радиотехнические системы и комплексы связи, как правило, используют следующие виды кодирования информации [2-4, 9]: сверточное кодирование; турбокодирование; кодирование с малой проверкой на четность (Low Density Parity Check (LDPC)); кодирование Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ).

В качестве альтернативы данным видам кодирования предлагается рассмотреть кодирование биортогональными последовательностями, так как оно имеет ряд преимуществ, а именно [9, 10]: высокую помехоустойчивость; декодирование сверточных, турбо, LDPC и БЧХ кодов требует сложных алгоритмов декодирования [11, 12], в то время как биортогональные сигналы могут быть более прямолинейными в использовании [13], что влечет за собой упрощение алгоритмов декодирования, что уменьшает вычислительные затраты при их обработке; стойкость к межсимвольным искажениям; обеспечивают высокую пропускную способность.

Биортогональный набор сигналов, который формируют M кодовых слов, представляет собой трансформацию ортогонального набора, включающего в 2 раза меньше слов, путем дополнения последнего отрицанием каждого сигнала [14, 15]:

$$B_k = \begin{bmatrix} H_{k-1} \\ \bar{H}_{k-1} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

где B_k – матрица биортогональных последовательностей, H_{k-1} – матрица ортогональных последовательностей (матрица Адамара), k – количество бит.

Исходя из этого, набор биортогональных сигналов при $M=8$ ($k=3$) имеет вид:

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Отметим, что исследуемый набор составлен из 2 кодов, ортогональных друг другу, где для каждого слова в одном наборе предусмотрено соотносящееся по значению и противоположное слово в другом наборе (антипод).

Достоинство подобного кодирования перед ортогональным состоит в том, что при передаче информации размер кодового слова биортогональных сигналов вдвое меньше, чем размер кодового слова ортогональных сигналов [16]. Таким образом, требования к полосе пропускания при использовании биортогональных кодов вдвое слабее, чем при использовании ортогональных. В дополнение, антиподные векторы сигналов обладают наиболее выигрышными пространственными параметрами, чем ортогональные [17].

Целью статьи является разработка способа демодуляции биортогональных сигналов с двоичной фазовой манипуляцией. Создание эффективных алгоритмов демодуляции биортогональных сигналов считается значимым, поскольку оно важно для реализации систем связи нового поколения, включая беспроводные сети, спутниковые каналы и системы передачи данных в условиях сильных помех. Внедрение таких алгоритмов в программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) позволяет снизить затраты на вычислительные ресурсы, повысить скорость обработки сигналов и обеспечить надежную передачу данных даже при низком отношении сигнал/шум.

Математическая модель сигнала с двоичной фазовой манипуляцией имеет вид [1-3]:

$$S(t) = A \times \sin(2\pi f_0 t + b(t)\varphi_0), \quad (3)$$

где A – амплитуда сигнала, f_0 – несущая частота, φ_0 – начальная фаза, $b(t)$ – информационный двоичный модулирующий фазу сигнал, который имеет значения 1 или -1 .

Временное представление сигнала с двоичной фазовой модуляцией приведено на рисунке 2, на котором показан сигнал низкой промежуточной частоты 10 МГц.

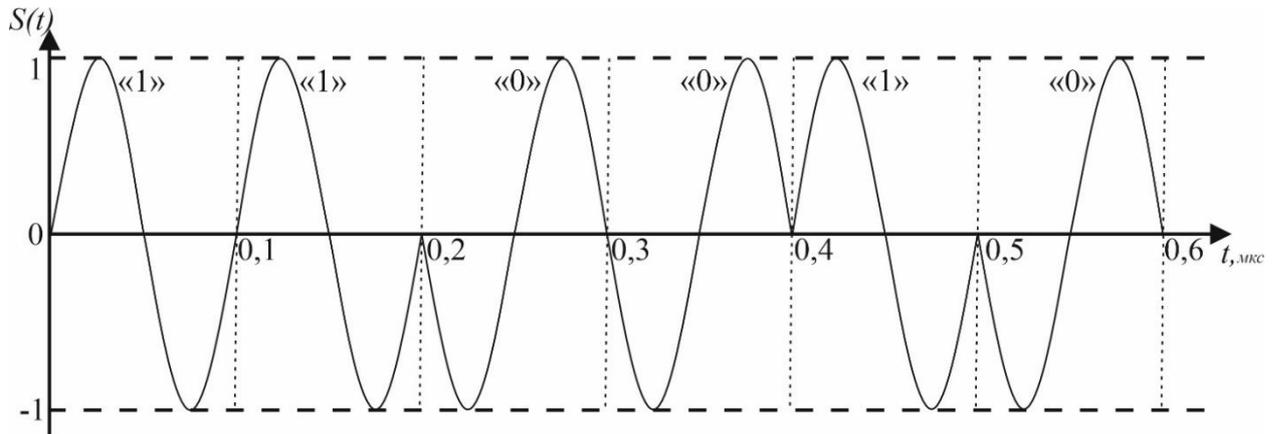


Рисунок 2 – Временное представление сигнала с двоичной фазовой манипуляцией

Описание способа демодуляции биортогональных сигналов

Для осуществления демодуляции двоичных фазоманипулированных биортогональных сигналов можно воспользоваться следующим способом, реализованном в предложенном устройстве, структурная схема которого представлена на рисунке 3.

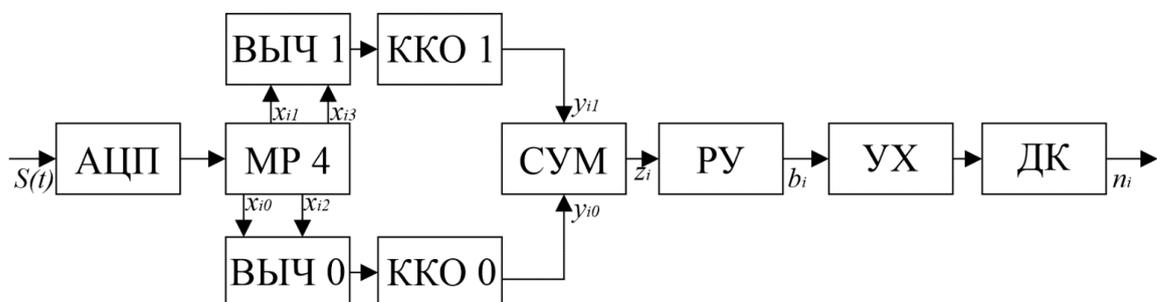


Рисунок 3 – Структурная схема демодулятора биортогональных сигналов

с двоичной фазовой манипуляцией

Структурная схема состоит из следующих компонентов: аналого-цифрового преобразователя (АЦП); многоразрядного регистра сдвига на четыре отсчета (МР4); вычитателей (ВЫЧ 0 и ВЫЧ 1); каналов квадратурной обработки (ККО 0 и ККО 1); сумматора (СУМ); решающего устройства (РУ); устройства хранения (УХ); декодера (ДК).

Информационный сигнал с BPSK поступает на вход АЦП, создающий 4 отсчета входного сигнала $x_{i0}, x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}$ на период повторения $T=1/f_0$, в соответствии с частотой дискретизации $f_{дискр}=4f_0$.

Процесс дискретизации для двух последовательных информационных элементов длительностью T_s ($T=10^{-7}$ с) соответственно при передаче 1 S_1 и при передаче 0 S_0 отображен на рисунке 4 пунктиром.

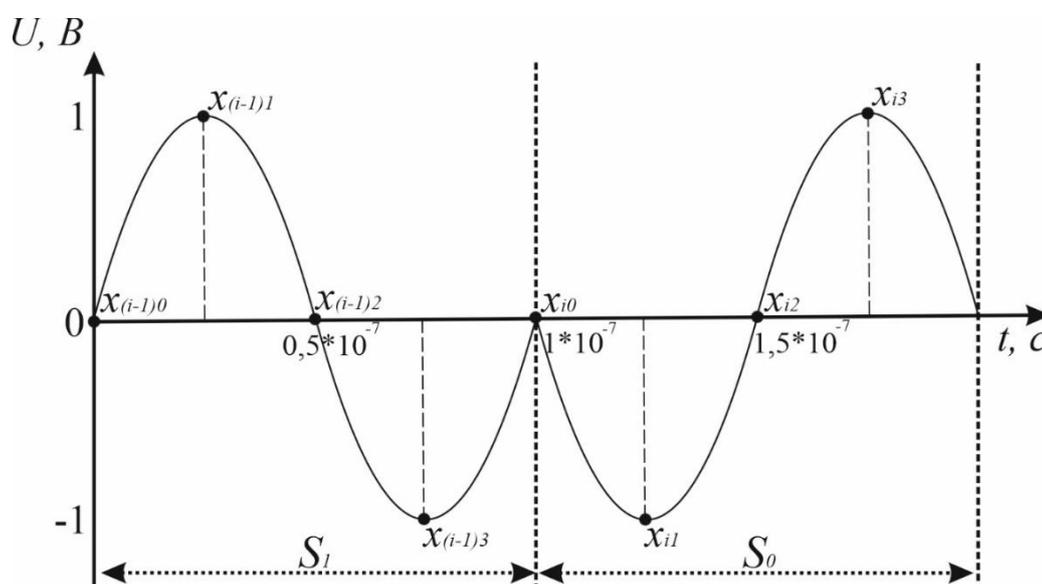


Рисунок 4 – Процесс дискретизации информационного сигнала

Значения отсчетов последовательно запоминаются в регистре сдвига многоразрядных кодов на четыре отсчета. Далее, значения четных отсчетов (x_{i1} и x_{i3})

вычитаются между собой в вычитателе ВЫЧ 1, а значения нечетных отсчетов (x_{i0} и x_{i2}) в вычитателе ВЫЧ 0 соответственно.

В рассматриваемом устройстве демодуляции реализуются два квадратурных канала обработки y_0 и y_1 (сдвиг времени относительно четных и нечетных отсчетов составляет $1/4$ периода сигнала и равен $\pi/2$ по фазе), которые определяют отклики на нечетные и четные отсчеты сигнала соответственно.

На выходе ККО0 вид отклика нечетных отсчетов сигнала:

$$y_{i0} = \sum_{i=0}^{N-1} (x_{i0} - x_{i2}), \quad (4)$$

а на выходе ККО1 – отклик на обработку четных отсчетов:

$$y_{i1} = \sum_{i=0}^{N-1} (x_{i1} - x_{i3}), \quad (5)$$

где $N-1$ – число обрабатываемых периодов T сигнала на входе АЦП, i – номер текущего периода T .

Результаты вычисления y_0 и y_1 с выходов ККО поступают в сумматор, где происходит процедура их сложения и на выходе сумматора получается значение амплитуды z_i :

$$z_i = y_{i0} + y_{i1}. \quad (6)$$

Далее результирующий сигнал z_i подается на вход решающего устройства, которое выполняет функцию компаратора и потактно (побитно) сравнивает принятое значение с предыдущим и выдает следующие значения на вход устройства хранения:

$$\begin{cases} b_i = 1 & \text{если } z_i \geq z_{i-1}, \\ b_i = 0 & \text{если } z_i < z_{i-1}. \end{cases} \quad (7)$$

Устройство хранения предназначено для формирования последовательности информационных элементов длиной N и подачи этой последовательности на вход декодера.

Декодер вычисляет номер биортогональной последовательности путем построения повторяющейся матрицы A принятой последовательности размером $N \times 2N$ и вычитания ее с заранее записанной матрицей возможных биортогональных последовательностей B :

$$C = A - B. \quad (8)$$

где C – разностная матрица.

Индекс строки, в которой разность этих двух матриц будет минимальной, и будет соответствовать номеру принятой биортогональной последовательности:

$$n_i^* = \arg \min_{\substack{n=1, \dots, N \\ m=1, \dots, 2N}} \{C_{n,m}\}. \quad (9)$$

где n и m – номер строки и столбца матрицы соответственно.

Выход декодера является одновременно выходом демодулятора.

С целью проверки разработанного способа на адекватность было проведено имитационное моделирование в среде MATLAB/Simulink и была получена зависимость вероятности ошибки принятой последовательности P_b от отношения сигнал/шум (ОСШ) E_b/N_0 , где E_b – энергия единичного бита, а N_0 – спектральная плотность мощности шума, так как данное отношение является количественной мерой производительности цифровых систем связи [17, 19].

Минимальная граница вероятности [20] ошибки приема биортогональных сигналов с двоичной фазовой манипуляцией [6, 18]:

$$P_b(M) \leq \frac{1}{2} \left[(M-2)Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) + Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \right], \quad (10)$$

где M – количество кодовых слов, $Q(x)$ – гауссов интеграл ошибок.

Графические зависимости вероятности ошибки от ОСШ представлены на рисунке 5, где под цифрой 1 указана вероятность ошибки при $M=32$, под цифрой 2 – при $M=64$, под цифрой 3 – при $M=128$, под цифрой 4 указана вероятность при $M=256$, полученные в результате моделирования.

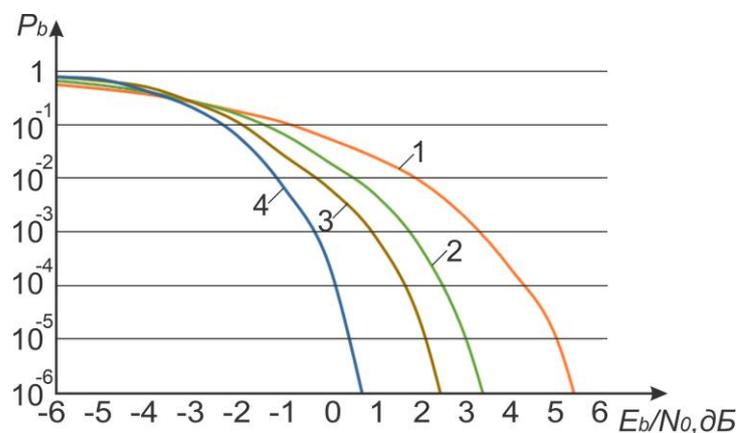


Рисунок 5 – Характеристики помехоустойчивости биортогональных последовательностей

Полученная зависимость подтверждает, что разработанный способ демодуляции биортогональных сигналов с двоичной фазовой манипуляцией является адекватным, так как теоретические данные (10) и полученные зависимости идентичны.

Заключение

Современные беспроводные системы связи (спутниковые, радиорелейные и военные системы связи), в которых важна высокая надежность передачи данных при ограниченной пропускной способности и в условиях помех, сталкиваются с

возрастающими требованиями к надежности передачи данных в условиях ограниченной полосы пропускания, повышенной вычислительной нагрузки и электромагнитных помех. Одним из ключевых аспектов повышения помехоустойчивости цифровых систем связи является выбор эффективного метода модуляции и соответствующего алгоритма демодуляции. В данном контексте особую актуальность приобретает использование BPSK-сигналов, обеспечивающих баланс между простотой реализации и высокой устойчивостью к внешним воздействиям.

Биортогональные коды, формируемые на основе ортогональных последовательностей, позволяют уменьшить требования к полосе пропускания по сравнению с традиционными ортогональными методами. Они обладают высокой энергетической эффективностью и меньшими вычислительными затратами при декодировании, что делает их привлекательными для применения в современных радиотехнических системах.

В работе представлен способ демодуляции сигнала, который разработан для реализации в программируемых логических интегральных схемах, вследствие чего его компоненты можно легко создать в программируемой логике с минимальными вычислительными затратами. Описанное устройство осуществляет прием «в целом» биортогональных последовательностей, что позволяет обеспечить высокую помехоустойчивость демодулятора.

Таким образом, в работе представлены способ демодуляции биортогональных сигналов с двоичной фазовой манипуляцией, структурная схема устройства его реализующего, и получены характеристики помехоустойчивости разработанного способа. Направлением дальнейших исследований является сравнение полученных

значений помехоустойчивости с иными существующими способами кодирования информации.

Список источников

1. Вознюк В.В., Копалов Ю.Н. Исследование помехоустойчивости приема OFDM-сигналов в условиях непреднамеренных узкополосных шумовых помех // Труды МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174611>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-14)
2. Крухмалёв В.В., Гордиенко В.Н. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей. - М.: Горячая линия-Телеком, 2004. 510 с.
3. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. – М.: Эко-Трендз, 2000. - 268 с.
4. Плаксиенко В.С., Плаксиенко Н.Е. Основы приема и обработки сигналов. - Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2016. Ч 1. - 80 с.
5. Поляков В.Б., Неретин Е.С., Иванов А.С. [и др.] Архитектура перспективных комплексов управления бортовым оборудованием // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=93459>
6. Прокис Дж. Цифровая связь. - М.: Радио и связь, 2000. - 800 с.
7. Peng Bo., Chen Q. PN Codes Estimation of Binary Phase Shift Keying Signal Based on Sparse Recovery for Radar Jammer // Sensors. 2023. V. 23, No. 1. P. 554. DOI: [10.3390/s23010554](https://doi.org/10.3390/s23010554)
8. Alhosban A. Binary Offset Carrier (BOC) and Binary Phase Shift Keying (BPSK) Modulation in Indoor Drones GNSS Receivers using Multipath Error Envelope MEE

- Technique // International Journal of Membrane Science and Technology. 2023. V. 10, No. 3. P. 460-475. DOI: [10.15379/ijmst.v10i3.1554](https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i3.1554)
9. Скляр Б. Цифровая связь. - М.: Вильямс, 2003. - 1104 с.
10. Рыбин В.В. Типовые разностные операторы в спектральной области в биортогональных базисах // Труды МАИ. 2010. № 37. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=13437>
11. Голиков А.М. Системы цифровой радиосвязи. - М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. - 340 с.
12. Важенин Н.А., Кирьянов И.А. Оценка статистических характеристик функционирования LDPC-декодера на имитационной модели // Труды МАИ. 2012. № 59. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=35250>
13. Важенин Н.А., Кирьянов И.А. Особенности программной реализации и характеристики декодера низкоплотностных кодов в среде MATLAB/Simulink // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21, № 2. С. 104-113.
14. Сорокин И.А., Тюндина Т.Е. Анализ современных методов и средств повышения спектральной эффективности систем связи // Вестник НГИЭИ. 2015. № 10 (53). С. 46-64.
15. Сорока Н.И., Кривинченко Г.А. Телемеханика. Системы контроля и управления. - Минск: БГУИР, 2020. Ч. 2. - 402 с.
16. Быков В.И. Устройства преобразования и обработки информации в системах подвижной связи. - Владимир: Изд-во Владимирского государственного университета, 2009. - 90 с.

17. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи: основы теории и принципы реализации. - М.: Наука, 2009. - 358 с.
18. Ярлыков М.С., Богачев А.С. Авиационные радиоэлектронные комплексы. - М.: ВАТУ, 2000. - 615 с.
19. Ботов М.И., Вяхирев В.А., Девогач В.В. Введение в теорию радиолокационных систем: монография. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. - 394 с.
20. Гейстер С.Р., Козлов С.В. Системное проектирование радиолокационных станций. - Минск: БГУИР, 2025. - 306 с.

References

1. Voznyuk V.V., Kopalov Yu.N. Investigation of the noise immunity of receiving OFDM signals in conditions of unintended narrowband noise interference. *Trudy MAI*. 2023. No. 130. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174611>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-14)
2. Krukhmalev V.V., Gordienko V.N. *Osnovy postroeniya telekommunikatsionnykh sistem i setei* (Fundamentals of building telecommunication systems and networks). Moscow: Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2004. 510 p.
3. Solov'ev YU.A. *Sistemy sputnikovoi navigatsii* (Satellite navigation systems). Moscow: Eko-Trendz Publ., 2000. 268 p.
4. Plaksienko V.S., Plaksienko N.E. *Osnovy priema i obrabotki signalov* (Fundamentals of signal reception and processing). Rostov-na-Donu: YuFU Publ., 2016. Ch. 1. 80 p.

5. Polyakov V.B., Neretin E.S., Ivanov A.S. et al. Architecture of advanced avionics control systems. *Trudy MAI*. 2018. No. 100. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93459>
6. Prokis Dzh. *Tsifrovaya svyaz'* (Digital communications). Moscow: Radio i svyaz' Publ., 2000. 800 p.
7. Peng Bo., Chen Q. PN Codes Estimation of Binary Phase Shift Keying Signal Based on Sparse Recovery for Radar Jammer. *Sensors*. 2023. V. 23, No. 1. P. 554. DOI: [10.3390/s23010554](https://doi.org/10.3390/s23010554)
8. Alhosban A. Binary Offset Carrier (BOC) and Binary Phase Shift Keying (BPSK) Modulation in Indoor Drones GNSS Receivers using Multipath Error Envelope MEE Technique. *International Journal of Membrane Science and Technology*. 2023. V. 10, No. 3. P. 460-475. DOI: [10.15379/ijmst.v10i3.1554](https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i3.1554)
9. Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz'* (Digital communications). Moscow: Vil'yams Publ., 2003. 1104 p.
10. Rybin V.V. Typical difference operators in the spectral domain in biorthogonal bases. *Trudy MAI*. 2010. No. 37. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=13437>
11. Golikov A.M. *Sistemy tsifrovoi radiosvyazi* (Digital radio communication systems). Moscow: Ai Pi Ar Media Publ., 2022. 340 p.
12. Vazhenin N.A., Kir'yanov I.A. Evaluation of statistical characteristics of LDPC decoder functioning on a simulation model. *Trudy MAI*. 2012. No. 59. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35250>

13. Vazhenin N.A., Kir'yanov I.A. Features of the software implementation and characteristics of the low-density code decoder in the MATLAB/Simulink environment. *Aerospace MAI Journal*. 2014. V. 21, No. 2. P. 104-113. (In Russ.)
14. Sorokin I.A., Tyundina T.E. Analysis of modern methods and means of increasing the spectral efficiency of communication systems. *Vestnik NGIEI*. 2015. No. 10 (53). P. 46-64. (In Russ.)
15. Soroka N.I., Krivinchenko G.A. *Telemekhanika. Sistemy kontrolya i upravleniya* (Telemechanics. Control and management systems). Minsk: BGUIR Publ., 2020. Ch. 2. 402 p.
16. Bykov V.I. *Ustroistva preobrazovaniya i obrabotki informatsii v sistemakh podvizhnoi svyazi* (Devices for converting and processing information in mobile communication systems). Vladimir: Izd-vo Vladimirskogo gosudarstvennogo universiteta Publ., 2009. 90 p.
17. Borisov V.I. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi: osnovy teorii i printsipy realizatsii* (Noise immunity of radio communication systems: fundamentals of theory and principles of implementation). Moscow: Nauka Publ., 2009. 358 p.
18. Yarlykov M.S., Bogachev A.S. *Aviatsionnye radioelektronnye komplekсы* (Aviation radioelectronic complexes). Moscow: VATU Publ., 2000. 615 p.
19. Botov M.I., Vyakhirev V.A., Devotchak V.V. *Vvedenie v teoriyu radiolokatsionnykh sistem: monografiya* (Radar systems introduction to the theory: a monograph). Krasnoyarsk: Sibirskii federal'nyi universitet Publ., 2012. 394 p.
20. Geister S.R., Kozlov S.V. *Sistemnoe proektirovanie radiolokatsionnykh stantsii* (System design of radar stations). Minsk: BGUIR Publ., 2025. 306 p.

Статья поступила в редакцию 01.02.2025

Одобрена после рецензирования 05.02.2025

Принята к публикации 25.06.2025

The article was submitted on 01.02.2025; approved after reviewing on 05.02.2025; accepted for publication on 25.06.2025