

## РАЗРАБОТКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ ДЕКОДЕРОВ ДЛЯ СИСТЕМ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ

Т.М. Саматов

samatovtm@student.bmstu.ru

SPIN-код: 7905-8388

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрены основные узлы цифровой системы передачи данных с ортогональным частотным разделением. Представлен один из способов эффективного осуществления ортогонального разделения поднесущих сигнала. Проанализирован способ повышения эффективности передачи данных, заключающийся в применении помехоустойчивого кодирования. В пакете MATLAB Simulink разработана модель цифровой системы передачи данных с применением помехоустойчивого кодирования и OFDM-модуляции. Проведено моделирование и подсчитаны коэффициенты битовой ошибки для трех различных вариантов разработанной системы. Приведены результаты моделирования в виде зависимостей вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум в канале передачи, показывающие, что код Голея (23, 12) дает наилучший результат, поскольку он способен исправить большее количество ошибок, чем другие коды.

### Ключевые слова

Помехоустойчивое кодирование, код Боуза — Чоудхури — Хоквингема, код Голея, эффективность передачи, моделирование в MATLAB Simulink, ортогональное разделение, модуляция

Поступила в редакцию 20.02.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

---

**Введение.** Основной задачей любой системы связи является эффективная, в том или ином смысле, передача информации. При передаче по каналу на сигнал влияют помехи, которые этот сигнал искажают. В таком случае при приеме будет обнаружено, что принятая информация не соответствует переданной. Таким образом, для систем связи актуальной является задача повышения помехоустойчивости. Одним из способов повышения помехоустойчивости является применение помехоустойчивого кодирования. Этот способ заключается в том, что к информационному сообщению по определенным алгоритмам добавляется избыточная информация, этот процесс называется кодированием. В свою очередь, на приемной стороне происходит декодирование, при котором данная избыточная информация используется для восстановления искаженных данных.

Цель работы — анализ влияния различных алгоритмов помехоустойчивого кодирования на эффективность цифровой системы передачи данных с ортого-

нальным частотным разделением (OFDM — orthogonal frequency-division multiplexing). В статье рассмотрены и смоделированы с помощью пакета MATLAB Simulink основные узлы цифровой системы передачи данных. Для оценки эффективности влияния помехоустойчивого кодирования на параметры разработанной системы были подсчитаны вероятности битовых ошибок для различных кодовых архитектур.

Основная идея OFDM-модуляции заключается в параллельной передаче данных на множестве несущих колебаний (поднесущих). Поднесущие выбирают ортогональными, поэтому, несмотря на то что спектры модулированных поднесущих имеют значительное перекрытие, межканальная интерференция из-за этого отсутствует, что позволяет добиться высокой спектральной эффективности. При этом в каждом канале может быть применена дополнительная модуляция, в данной работе каждый канал модулируется QPSK-модуляцией. OFDM-символ является суперпозицией  $N$  ортогональных поднесущих [1] и его комплексная огибающая описывается формулой

$$s_{\text{пер}}(t) = \sum_{k=1}^N X_k e^{i\omega_k t}, \quad t \in [0, T_u], \quad (*)$$

где  $X_k$  и  $\omega_k = 2\pi f_k$  — комплексная амплитуда и круговая частота  $k$ -й гармоники;  $T_u$  — длительность символа.

Высокая спектральная эффективность обеспечивается достаточно близким расположением центральных частот  $f_k$  соседних каналов, при этом, чтобы избежать межканальной интерференции, на передающей стороне обеспечивают ортогональность всех поднесущих:

$$\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} e^{i\omega_k t} e^{-i\omega_j t} dt = \delta_{kj},$$

где  $\delta_{kj}$  — символ Кронекера. Это условие выполняется, если расстояние между поднесущими по частоте кратно  $\Delta f_c = 1/T_u$ .

Для снижения аппаратных затрат при модуляции и демодуляции поднесущих используют пару дискретных преобразований Фурье, выполняемых, как правило, с применением алгоритмов быстрого преобразования Фурье. Благодаря этому оборудование оказывается сравнительно простым, поскольку исключается необходимость использования наборов генераторов гармонических поднесущих колебаний и когерентных демодуляторов, которые необходимы при обычном частотном разделении каналов. Структурная схема OFDM-системы с использованием преобразований Фурье [2] показана на рис. 1.

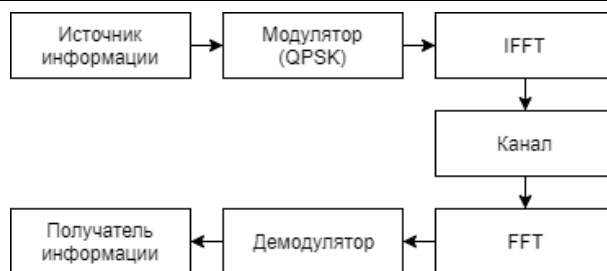


Рис. 1. Структурная схема OFDM-системы

При распространении OFDM-символа возможно частичное перекрытие во временной области текущего символа и задержанных копий других символов, что приводит к межсимвольной интерференции [3]. Для снижения ее влияния перед каждым OFDM-символом добавляют циклический префикс длительностью  $T_g$ , которая составляет до 1/4 длительности символа. Наглядно это продемонстрировано на рис. 2.

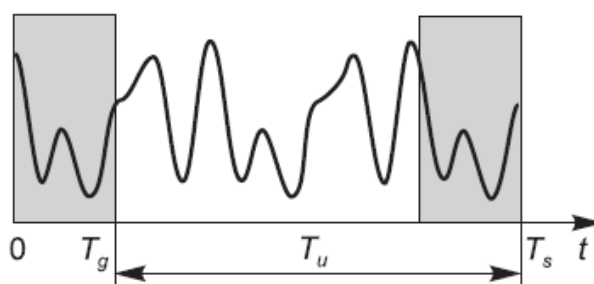


Рис. 2. Структура OFDM-символа во временной области

В этом случае выражение (\*) принимает вид

$$s(t) = \sum_{k=1}^N X_k e^{i\omega_k(t-T_g)}, \quad t \in [0, T_u + T_g].$$

Общая длительность символа, таким образом, составляет

$$T_s = T_u + T_g.$$

Повысить эффективность системы, как было сказано выше, можно с помощью помехоустойчивого кодирования. В этом случае двоичная информация кодируется, и только после этого двоичная последовательность поступает на вход модулятора. Аналогично на приемной стороне происходит декодирование демодулированного сигнала. Структурная схема OFDM-системы показана на рис. 3.

В пакете MATLAB Simulink была разработана модель данной системы [4]. В роли источника информации выступает генератор двоичных чисел со скоростью 4 Кбит/с. Модель источника данных также включает в себя блок добавления преамбулы, необходимой для устранения фазовой неоднозначности, которая может возникнуть на приемной стороне при QPSK-демодуляции.



Рис. 3. Структурная схема OFDM-системы с применением кодирования

Далее происходит кодирование информации. Для моделирования были выбраны две кодовые архитектуры, доступные в библиотеке пакета MATLAB Simulink: код Боуза — Чоудхури — Хоквингема (БЧХ) (15, 5) и код Голея (23, 12) [5, 6]. Второе число определяет длину (в битах) информационного слова, которое кодируется. Первое число определяет длину так называемого кодового слова, т. е. уже закодированного слова. Код БЧХ (15, 5) относится к классу линейных кодов, для которых определено понятие порождающего полинома. Данный полином определяет корректирующие свойства кода. Для кода БЧХ (15, 5), который исправляет две ошибки, был выбран полином

$$g(x) = x^{10} + x^8 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1.$$

Для кода Голея, исправляющего три ошибки, был выбран полином

$$g(x) = x^{11} + x^{10} + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + 1.$$

С выхода кодера данные поступают на вход модулятора. В модуляторе происходит QPSK-модуляция каждого канала, а также применяется ортогональное разделение поднесущих с помощью обратного преобразования Фурье [7]. Размерность обратного преобразования Фурье соответствует количеству поднесущих. Было использовано 160 поднесущих. С учетом добавленного циклического префикса OFDM-символ состоит из 206 ортогональных поднесущих. Модель модулятора показана на рис. 4, спектр сформированного OFDM-символа

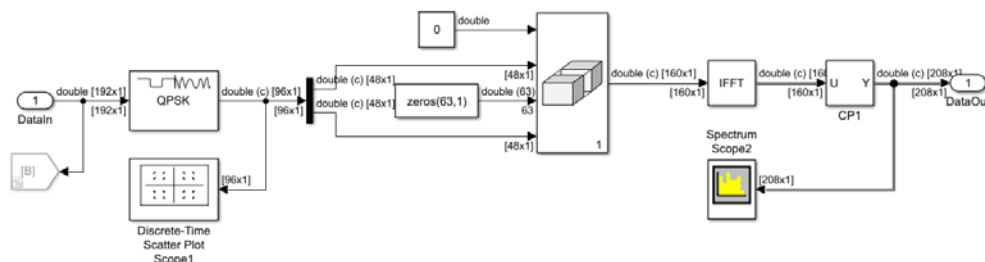


Рис. 4. Блок модулятора:

QPSK — квадратурная фазовая модуляция; DataIn — входные данные; Discrete Time Scatter Plot — дискретный точечный график; IFFT — быстрое обратное преобразования Фурье; Spectrum Scope — отображение спектра; DataOut — выходные данные; double — число с плавающей запятой; CP — циклический префикс; zeros — нули

показан на рис. 5. Полученный сигнал переносится на рабочую частоту (20 кГц) и отправляется по каналу. В качестве модели канала выбран блок AWGN из библиотеки MATLAB Simulink.

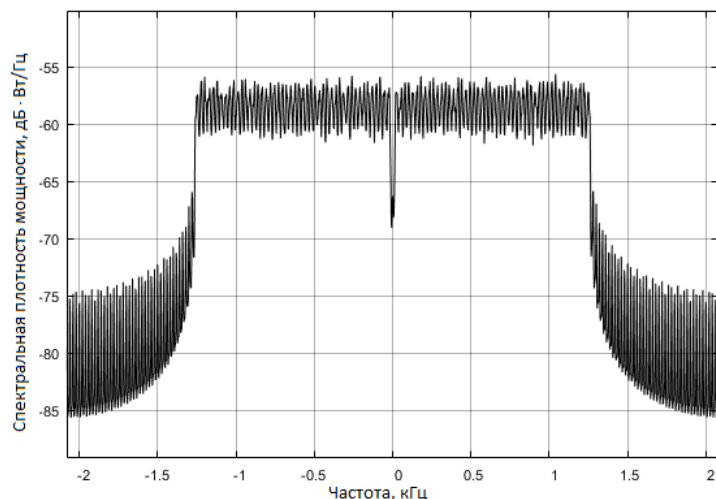


Рис. 5. Спектр сформированного OFDM-символа

На приемной стороне происходит перенос сигнала на нулевую частоту. После переноса происходит OFDM-демодуляция. Применяется прямое преобразование Фурье, удаляется циклический префикс. На выходе блока получается комплексная огибающая OFDM-сигнала. На рис. 6 показана модель блока OFDM-демодулятора.

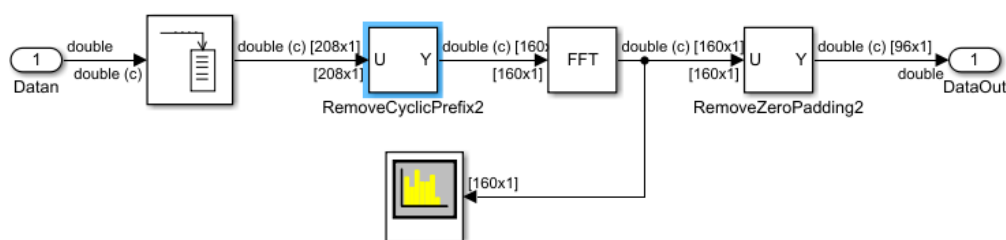


Рис. 6. Блок OFDM-демодулятора:

RemoveCyclicPrefix — удаление циклического префикса; FFT — быстрое преобразование Фурье; RemoveZeroPadding — удаление нулей

Далее для каждого из подканалов происходит восстановление несущей частоты и устранение фазовой неоднозначности [8]. На рис. 7 представлена разработанная модель блока восстановления несущей частоты. Блок состоит из петлевого фильтра, генератора, управляемого напряжением (ГУН), и фазового детектора. На рис. 8 показана модель блока фазового детектора, на рис. 9 — петлевой фильтр и ГУН.

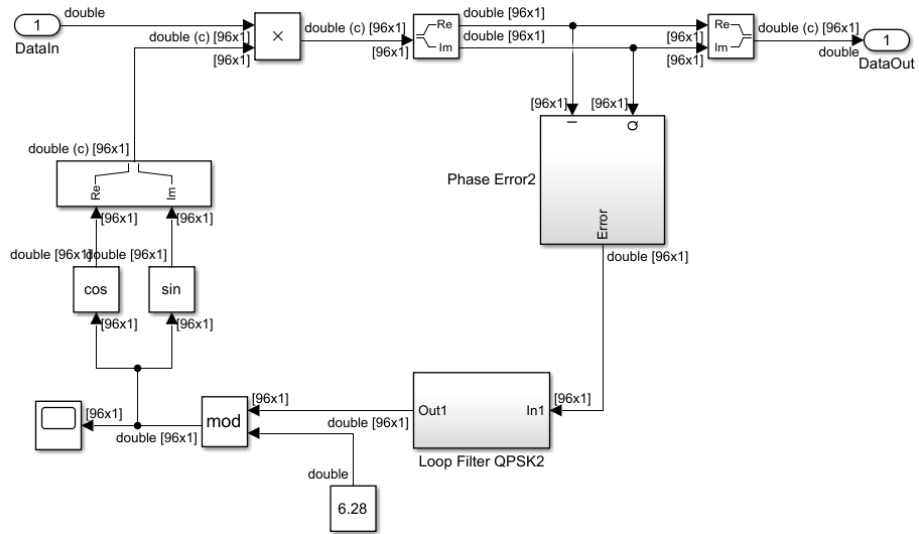


Рис. 7. Блок восстановления несущего колебания:

PhaseError — фазовая ошибка; Loop Filter — петлевой фильтр; mod — остаток от деления;  
I — синфазная составляющая; Q — квадратурная составляющая

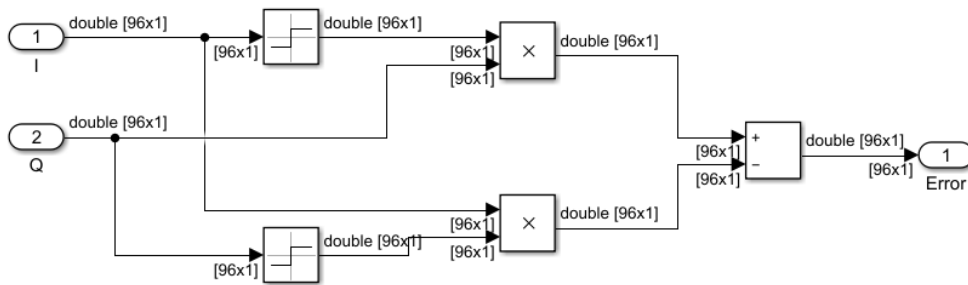


Рис. 8. Блок фазового детектора:

I — синфазная составляющая; Q — квадратурная составляющая; Error — ошибка

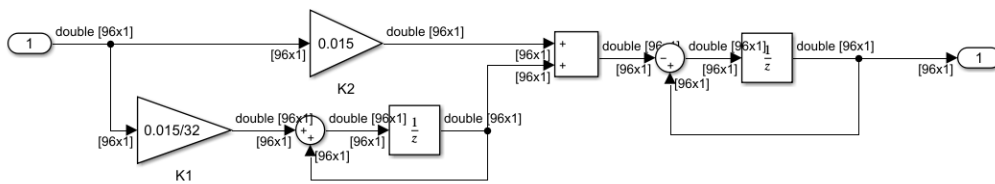


Рис. 9. Блоки петлевого фильтра и ГУН:

1/z — задержка данных; K1, K2 — множители

Затем устранялась фазовая неоднозначность. Поскольку используется QPSK-модуляция, то необходимо предусмотреть четыре возможных случая для смещения фазы: 0, 90, 180, 270°. Модель блока показана на рис. 10. Результат работы данного блока наглядно продемонстрирован на рис. 11.

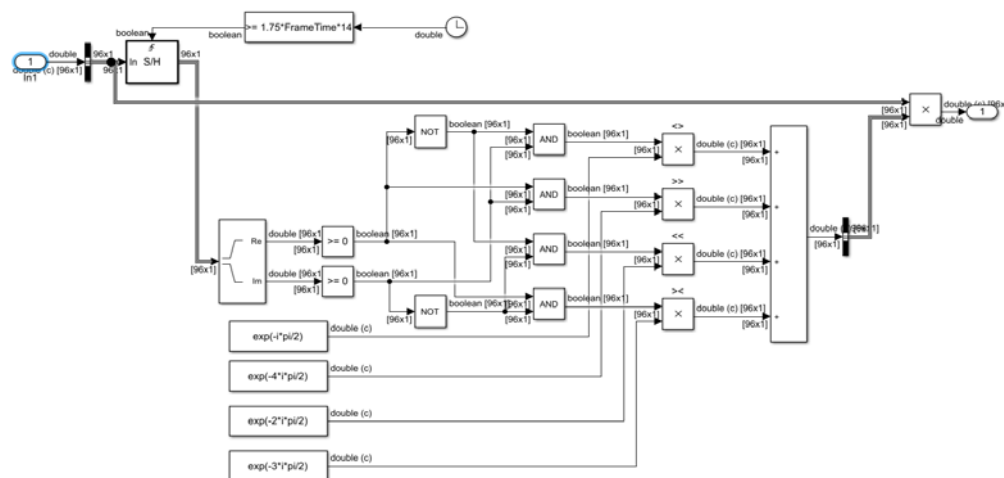


Рис. 10. Блок устранения фазовой неоднозначности:

AND — логическое «И»; NOT — логическое «НЕ»; S/H — выборка и хранение; exp — экспонента; boolean — логический тип данных; Re — вещественная часть; Im — мнимая часть; FrameTime — длительность одного кадра

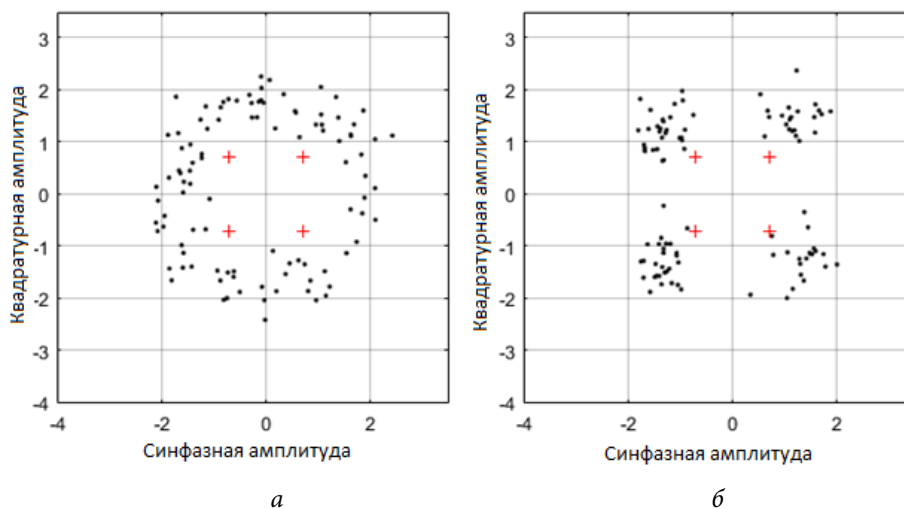


Рис. 11. Результат работы блока:

а — созвездие на входе данного блока; б — восстановленное созвездие QPSK-сигнала

На заключительном этапе происходит вычисление оценки вероятности битовой ошибки [9] (BER — bit error rate). Оценка вероятности рассчитывалась следующим образом:

$$K = \frac{N_e}{N_t},$$

где  $N_e$  — количество бит, переданных с ошибкой,  $N_t$  — суммарное количество переданных бит (в данной модели это число равно  $10^7$  бит).

В результате моделирования были получены зависимости оценки вероятности битовой ошибки от отношения сигнал-шум для системы, не содержащей помехоустойчивый кодер (без кодирования), содержащей помехоустойчивый кодер БЧХ (15, 5) и кодер Голея (23, 12). Результаты моделирования выведены на график и представлены на рис. 12. Было получено, что при  $BER = 10^{-7}$  код Голея (23, 12) превосходит код БЧХ (15, 5) на 2 дБ.

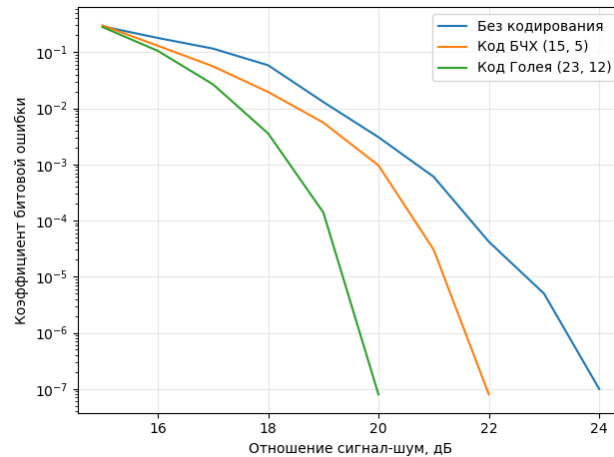


Рис. 12. Результаты расчета коэффициента битовой ошибки

**Выводы.** В данной работе рассмотрены основные узлы OFDM-системы. Проведено моделирование в MATLAB Simulink. Рассчитаны коэффициенты битовой ошибки для трех вариантов: в случае отсутствия кодирования, для кода БЧХ (15, 5) и для кода Голея (23, 12). В результате было получено, что код Голея (23, 12) дает наилучший результат, поскольку он позволяет исправить большее количество ошибок.

### Литература

- [1] Маглицкий Б.Н. Основы технологии OFDM. Новосибирск, СибГУТИ, 2016.
- [2] Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М. и др. Технология OFDM. М., Горячая линия-Телеком, 2016.
- [3] Варгаузин В.А., Цикин И.А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи. СПб., БХВ-Петербург, 2013.
- [4] Giordano A.A, Levesque A.H. Modeling of digital communication systems using SIMULINK. Wiley, 2015.
- [5] Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. М., Мир, 1986.
- [6] Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. М., Техносфера, 2005.
- [7] Proakis J.G., Salehi M. Communication systems engineering. Pearson, 2013.
- [8] Акиншин Р.Н., Сидоркина Ю.А., Цисарский А.Д. и др. Методы повышения эффективности цифровых систем передачи информации. М., ФГУП ЦНИИМАШ, 2014.
- [9] Кузнецов Н.А., ред. Теория кодирования как задача поиска глобального экстремума. М., Горячая линия-Телеком, 2018.



**Саматов Тимур Маратович** — магистрант кафедры «Автономные информационные и управляющие системы», МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Сидоркина Юлия Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Автономные информационные и управляющие системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Саматов Т.М. Разработка помехоустойчивых декодеров для систем с ортогональным частотным разделением. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 02(43). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-02-579>

---

**DEVELOPMENT OF NOISE-RESISTANT DECODERS FOR SYSTEMS WITH ORTHOGONAL FREQUENCY SEPARATION**

T.M. Samatov

samatovtm@student.bmstu.ru

SPIN-code: 7905-8388

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation****Abstract**

*The article is devoted to the main components of a digital data transmission system with orthogonal frequency division. One of the methods for efficiently implementing orthogonal separation of signal subcarriers is presented. The method of increasing the efficiency of data transmission, which consists in the use of noise-resistant coding, is analyzed. A model of a digital data transmission system was developed in the MATLAB Simulink package using noise-resistant coding and OFDM modulation. Simulation was carried out and bit error coefficients were calculated for three different variants of the developed system. The simulation results are presented in the form of dependences of bit error probability on the signal-to-noise ratio in the transmission channel, showing that the Golei code (23, 12) gives the best result, since it is able to correct more errors than other codes.*

**Keywords**

*Noise-resistant coding, Bowes-Chowdhury-Hockingham code, Golei code, transmission efficiency, modeling in MATLAB Simulink, orthogonal separation, modulation*

Received 20.01.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

**References**

- [1] Maglitskiy B.N. Osnovy tekhnologii OFDM [Fundamentals of OFDM technology]. Novosibirsk, SibGUTI Publ., 2016 (in Russ.).
- [2] Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Shloma A.M., et al. Tekhnologiya OFDM [OFDM technology]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2016 (in Russ.).
- [3] Vargauzin V.A., Tsikin I.A. Metody povysheniya energeticheskoy i spektral'noy effektivnosti tsifrovoy radiosvyazi [Methods for raising energy and spectral efficiency of digital radio communication]. Sankt-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2013 (in Russ.).
- [4] Giordano A.A., Levesque A.H. Modeling of digital communication systems using SIMULINK. Wiley, 2015.
- [5] Blahut R.E. Theory and practice of error control codes. Addison-Wesley, 1983. (Russ. ed.: Teoriya i praktika kodov, kontroliruyushchikh oshibki. Moscow, Mir Publ., 1986.)
- [6] Morelos-Zaragoza R.H. The art of error correcting coding. Wiley, 2006. (Russ. ed.: Iskustvo pomekhoustoychivogo kodirovaniya. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005.)
- [7] Proakis J.G., Salehi M. Communication systems engineering. Pearson, 2013.
- [8] Akinshin R.N., Sidorkina Yu.A., Tsisarskiy A.D., et al. Metody povysheniya effektivnosti tsifrovyykh sistem peredachi informatsii [Methods for raising efficiency of digital information transmission systems]. Moscow, FGUP TsNIIMASh Publ., 2014 (in Russ.).

- [9] Kuznetsov N.A., ed. *Teoriya kodirovaniya kak zadacha poiska global'nogo ekstremuma* [Coding theory as a problem of global extremum seeking]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2018 (in Russ.).

**Samatov T.M.** — Master's Degree Student, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Sidorkina Yu.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Samatov T.M. Development of noise-resistant decoders for systems with orthogonal frequency separation. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 02(43). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-02-579.html> (in Russ.).