

В.К. Чернов¹, С.Г. Чумаров¹

¹ Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Российская Федерация

РЕАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ТУРБОКОДА ДЛЯ OFDM СИСТЕМЫ

Аннотация. В данной работе рассматривается OFDM система, где в качестве помехоустойчивого кодера используется турбокод. Турбокод состоит из двух систематических сверточных кодов со скоростью кодирования 1/2. Перемежитель, составляющий часть турбокода, является случайным (S-random), а входной поток данных имеет длину 1244 бита. Моделирование системы осуществлялось при помощи программного обеспечения MatLab. В качестве вида модуляции использовалась QAM-256, а канал связи представлен в виде распределения Релея с аддитивным белым гауссовским шумом. По результатам моделирования построены графики зависимостей величины битовой ошибки (BER) от отношения энергии сигнала на 1 бит информации к энергетической спектральной плотности шума (E_b/N_0).

Ключевые слова: OFDM, турбокод, перемежитель, сверточный код, декодер, алгоритм LOG-MAP, распределение Релея

V.K. Chernov¹, S.G. Chumarov¹

¹ Chuvash State University, Cheboksary, Russian Federation

IMPLEMENTATION OF THE TURBO CODE STRUCTURE FOR OFDM SYSTEM

Abstract. In this paper, an OFDM system is considered, where a turbo code is used as an error-correcting encoder. The turbo code consists of two systematic convolutional codes with a coding rate of 1/2. The interleaver, which is part of the turbo code, is random (S-random), and the input data stream is 1244 bits long. The system was simulated using the MatLab software. QAM-256 was used as the type of modulation, and the communication channel was presented in the form of a Rayleigh distribution with additive white Gaussian noise. Based on the simulation results, graphs of the dependences of the bit error (BER) value on the ratio of the signal energy per 1 bit of information to the energy spectral noise density (E_b / N_0) were constructed.

Keyword: OFDM, turbo code, interleaver, convolutional code, decoder, LOG-MAP algorithm, Rayleigh distribution.

Введение. В беспроводных системах связи канал между передатчиком и приемником всегда искажает передаваемую информацию. Канал может быть частотно-избирательным из-за многолучевого распространения или избирательным во временной области вследствие движения элементов в системе связи. Модуляция с несколькими поднесущими, к примеру, ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM), очень устойчиво к эффекту многолучевого распространения и позволяет восстановить переданные данные с низкой вероятностью появления ошибки, особенно в случае использования канального помехоустойчивого кодирования. Все современные системы связи (WiFi, WiMax, LTE, 5G и др.) используют OFDM, который является стандартом для данных систем ввиду экономного расходования спектра, высокой пропускной способности в сочетании с MIMO [1-2], повышенной помехозащищенности и других факторов. OFDM-система также может применяться и при проектировании систем на основе программно-определяемого радио [3].

В современных цифровых системах связи для построения OFDM применяется обратное быстрое преобразование Фурье. Процесс демодуляции применяет, соответственно, прямое быстрое преобразование Фурье [4,5]. Выражение для OFDM-модулятора можно записать в виде:

$$x_n(kT_s) = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{n \in Z} \sum_{m=0}^{K-1} C_{m,n} e^{j2\pi m F_s \tau_s} = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{n \in Z} \sum_{m=0}^{K-1} C_{m,n} e^{j2\pi m \frac{k}{K}}, \quad (1)$$

где $k = 0, 1, \dots, K - 1$, $C_{m,n}$ – есть исходные последовательные символы после блока BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64 и т.д.

Для демодуляции используется БПФ:

$$y_n = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{n \in Z} \sum_{m=0}^{K-1} x_{m,n} e^{-j2\pi m \frac{k}{K}}, \quad (2)$$

где y_n – сигнал, прошедший через канал с замиранием и АБГШ.

Помимо аддитивных помех, в канале связи имеются мультипликативные помехи, связанные с многолучевым распространением или с Доплеровским сдвигом частоты [6]. При распространении радиоволн в каналах передачи возможны два случая [7]:

- сильный прямой сигнал распространяется совместно с его слабыми копиями. В таком случае выполняется условие прямой видимости между приемником и передатчиком. Это обычно характерно для открытой местности с хорошей видимостью передатчика (базовой станцией). Такой эффект может возникать и посредством отражений волны от гладкой поверхности препятствия. Данный канал моделируется на основе распределения Райса;

- сильный прямой сигнал практически отсутствует, и принимаются его слабые копии. Здесь выполняется условие отсутствия прямой видимости, что характерно для крупных городов. Модель канала связи основана на распределении Релея и более близка к реальным каналам. [8].

Распределение Релея (рис. 1) от случайно величины X имеет вид:

$$P(X \leq x) = \int_0^x f(\xi) d\xi = 1 - e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad f(x, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где $x \geq 0$, $\sigma > 0$, а $f(x, \sigma)$ – есть плотность вероятности.

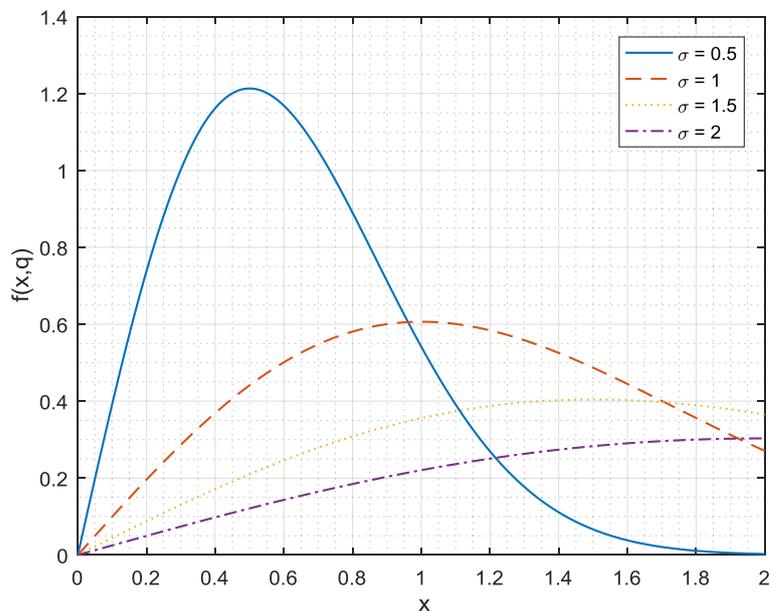


Рис. Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует. Распределение Релея.

Для возможности корректного восстановления сигнала в случае искажения части передаваемой информации применяют методы помехоустойчивого кодирования. Одним из самых современных методов коррекции ошибок является код, построенный на основе составных сверточных рекурсивных кодов. Данный код носит название турбокод и вместе с LDPC-кодом [9] наиболее близко подходит к границе Шеннона [10]. Особенно эффективно проявляет себя турбокод в плохом канале связи, т.е. при высокой вероятности битовой ошибки (BER).

Турбокодер и декодер. Обычно при построении используют турбокодер, состоящий из двух или более одинаковых рекурсивных сверточных кодов [11], разделенных между собой перемежителем (рисунок 2(а)). На данном рисунке d_k – входная последовательность бит, которая совпадает со значениями на систематическом выходе u_k . Выходные последовательности v_{1k} и v_{2k} содержат в себе только проверочные биты. После кодирования информации на вход одного из составляющих кодов подаются дополнительные биты, которые позволяют завершить работу кодера в нулевом состоянии, т.к. обычно входная последовательность бит делится на блоки фиксированной длины.

Турбокоды также представляют в виде передаточной функции, которая описывается полиномами составных кодов. Для рисунка 2(а) выражение будет иметь вид:

$$G(D) = \left[1, \frac{g_1(D)}{g_0(D)} \right], \quad (4)$$

где $g_0(D) = 1 + D^2 + D^3$ и $g_1(D) = 1 + D + D^3$

Схема перемежения кодированного сообщения перед передачей и обратная операция на приёме позволяют уменьшить корреляцию между входной последовательностью до перемежения и после, что позволяет увеличить кодовое расстояние, а также рассеять пакет ошибок во времени, делая ошибки случайными (псевдослучайными). Обычно перемежение используется для того, чтобы бороться с группирующими ошибками в канале связи. В качестве перемежителя можно использовать блочные, сверточные, циклические, случайные, псевдослучайные перемежители [12-14]. На сегодняшний день детерминированные схемы перестановок входных битов уступают случайным (псевдослучайным) схемам.

Так как длина перемежителя всегда конечна (обычно она пропорциональна входной последовательности), то можно определить вес каждого кодового слова d , количество слова такого веса N_d и суммарный вес Хэмминга соответствующих им информационных слов w_d . Вероятность ошибки турбокода определяется как [15]:

$$P_b = \sum_{d=1}^N \frac{w_d}{k} Q \left(\sqrt{\frac{2RdE_b}{N_0}} \right); \quad Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) dx, \quad (5)$$

где k – длина информационного бита, R – кодовая скорость, $Q(x)$ – интеграл ошибок. На рисунке 2(б) показан график зависимости величины битовой ошибки от величины отношения энергии бита/шум (E_b/N_0) в двоичном канале связи при наличии аддитивного белого шума.

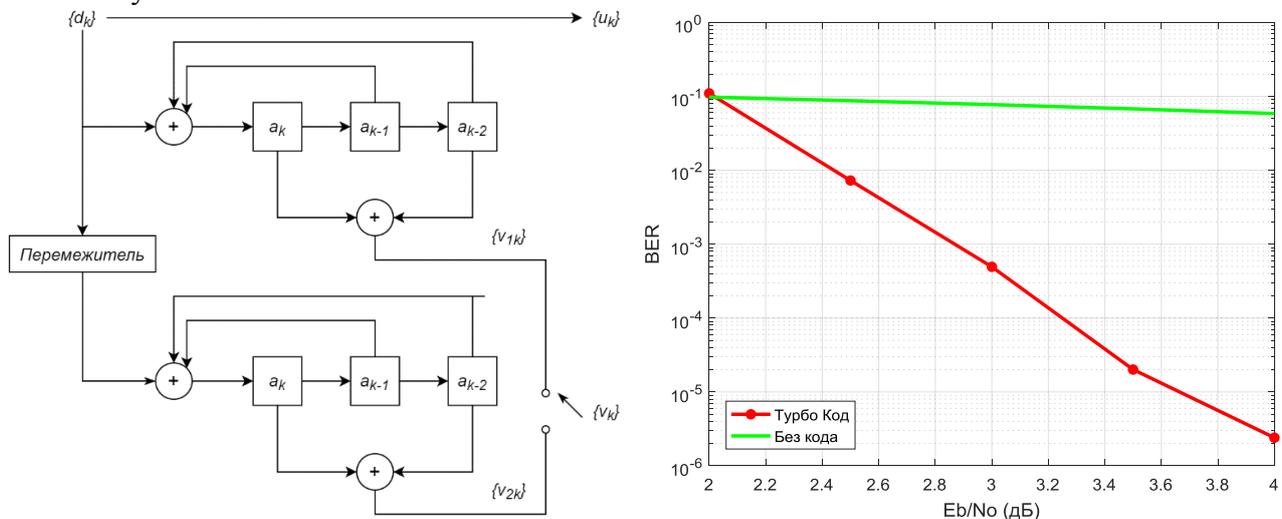


Рис. 2 (а) Параллельное соединение двух РСС кодеров. (б) Зависимость величины битовой ошибки от отношения (E_b/N_0).

Одним из самых эффективных способов декодирования является применение алгоритма Log-MAP (усовершенствованная версия MAP-алгоритма). Данный алгоритм удобно представить в виде логарифмического отношения функций правдоподобия (log-likelihood ratio – LLR):

$$L(\bar{d}_k) = \ln \frac{P(\bar{d}_k = 1 | r)}{P(\bar{d}_k = 0 | r)}, \quad (6)$$

где \bar{d}_k – принятый бит, а r – принятая последовательность.

Схема итеративного декодера на основе MAP представлена на рисунке 3

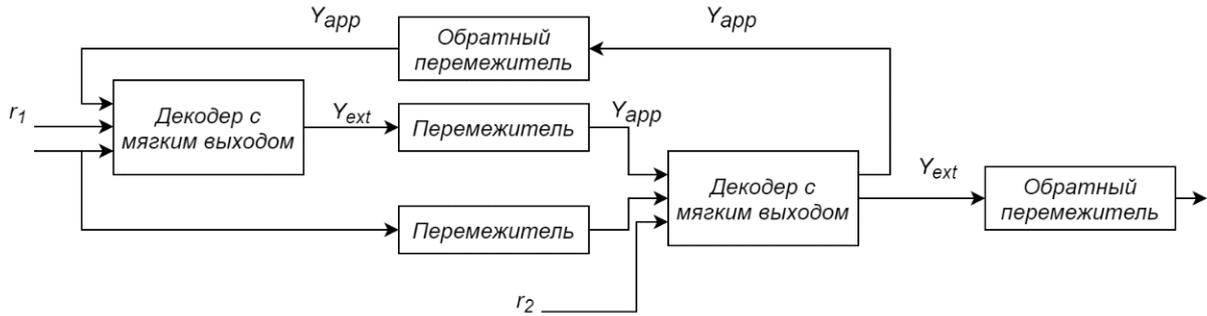


Рис. 3. Схема итеративного декодера турбокода на основе алгоритма MAP.

Принятая последовательность символов из канала равна $z = \{y, r1, r2\}$, где y – есть систематическая часть кода, принятая из канала, а $r1, r2$ – избыточные проверочные символы, а Y_{app} и Y_{ext} – систематические и априорные внешние составляющие надежности. Априорные вероятности, поступающие на вход первого декодера с мягким входом, обычно равны нулю, так как информация об априорных вероятностях на первой итерации неизвестна.

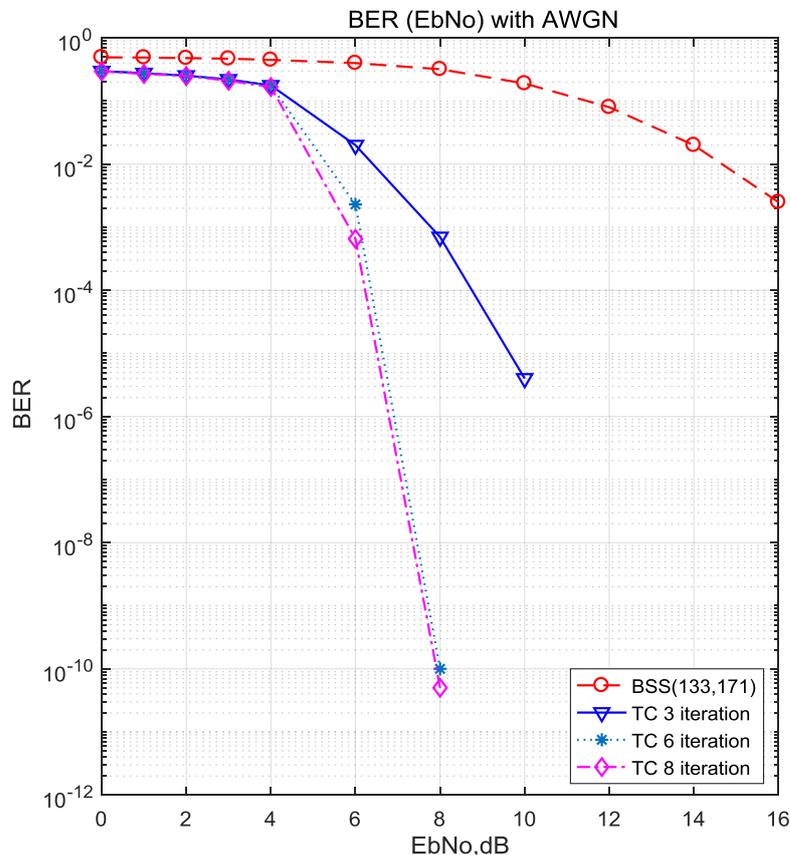


Рис. 4. График зависимости величины битовой ошибки от отношения E_b/N_0

После этого на вход второго декодера поступают систематические биты, подверженные перемежению, и, соответственно, проверочные биты второго декодера. Второй декодер на основе полученной информации формирует условную вероятность для возможности более надежного декодирования бит. После этого первый этап итерации заканчивается, и далее первый декодер в качестве априорной вероятности использует условную апостериорную вероятность второго декодера. После определенного ранее числа итераций итеративный турбодекодер заканчивает свою работу. График вероятностей битовой ошибки для различного рода итераций турбодекодера показан на рисунке 4. При увеличении количества итераций уменьшается величина битовой ошибки. При шести-восьми итерациях графики почти накладываются друг на друга. Дальнейшее увеличение итераций не приводит к уменьшению вероятностей ошибок. Для сравнения работы турбокода на рисунке также продемонстрирован нерекурсивный сверточный код, корректирующие способности которого уступают выше представленному турбокоду на несколько порядков.

Заключение. Для OFDM системы наличие корректирующего помехоустойчивого кода позволяет уменьшить вероятность появления ошибок в канале связи. В качестве основного кода в данной работе был использован турбокод, состоящий из двух рекурсивных сверточных кодов, разделенных перемежителем. Данный вид кода особенно эффективно показывает себя в каналах с большой величиной ошибок. Такие типы кодов применяют для мобильной связи стандарта 3G, LTE из-за несложной конструкции турбокодера и высоких корректирующих способностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Магнитский В.А., Чумаров С.Г. Реализация технологии MIMO в сетях нового поколения 5G // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 226-231.
2. Чумаров С.Г. Пропускная способность волоконно-оптических информационно-измерительных систем // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.1. – С. 201-202.
3. Чумаров С.Г., Милкин Ю.С. Особенности реализации и применения программно-определяемых радиосистем // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 13-й Всерос. науч.-практ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 442-443.
4. Schulzeand H., Luder C. Theory and applications of OFDM and CDMA. Wideband Wireless Communications. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2005. – 421 p.
5. Van Nee R., Prasad R. OFDM for Wireless Multimedia Communications. Boston: Artech House, 2000. – 279 p.
6. Savaux V. Contribution to multipath channel estimation in an OFDM modulation context. Dokt. Thesis. France. Autre. Supélec, 2013. – P. 198.
7. Технология OFDM. Учебное пособие для вузов / М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин, А. М. Шлома, А. П. Шумов. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2017. – 352 с.
8. Pätzold M., Wang C.-X., Hogstad B.O. Two New Sum-of-Sinusoids-Based Methods for the Efficient Generation of Multiple Uncorrelated Rayleigh Fading Waveforms. IEEE Trans. On Commun. – 2009. – Vol. 8. – № 6. – P. 3122-3131.
9. Gallager R. G. Low density parity check codes // IRE Trans. Inform. Theory. Jan. 1962. Vol. IT-8. P. 21-28.
10. C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. in Proc. IEEE Int. Commun. Conference (ICC), 1993, pp. 1064-1070.

11. Dolinar S., Divsalar D. Weight Distributions for Turbo Codes Using Random and Nonrandom Permutations, JPL TDA Progress Report, pp. 56-65, Aug. 1995
12. S. Crozier. New high-spread high-distance interleavers for turbo-codes. In Proc. 20th Biennial Symp. on Communications. Kingston, ON, Canada, May 2000, pp. 3-7.
13. L. Dinoi and S. Benedetto. Design of prunable S-random interleavers, InProc. Int. Symp. on Turbo Codes, Brest, France, 2003, pp. 279-282.
14. M. Ferrari, F. Scalise, and S. Bellini. Prunable S-random interleavers, InProc. IEEE Int. Commun. Conf. (ICC), vol. 3, 2002, pp. 1711-1715.
15. В.В. Зяблов. Дистанционное свойство турбокодов с различными перемежителями / В.В. Зяблов, М.А. Цветков // Информационные процессы. – Т. 3. – 2003. – № 2. – С. 93-96.

REFERENCES

1. Magnitsky V.A., Chumarov S.G. *Realizatciya tehnologii MIMO v setyax novogo pokoleniya 5G* [Implementation of MIMO technology in 5G new generation networks] // *Problemy I perspektivy razvitiya energeticy, electrotechnicy i energoeffektivnosti, materialy II Mezhdunar. naych-tech konferencii*, [Problems and prospects for the development of energy, electrical engineering and energy efficiency: materials of the II Intern. scientific and technical conf]. - Cheboksary: Chuvash Publishing House. University, 2018. S. 226-231.
2. Chumarov S.G. *Propusknaya sposobnost volokonno-opticheskix informacionno-izmeritelnyx system* [Throughput of fiber-optic information-measuring systems] // *SAPR I modelirovanie v sovremenoy electronice: sb. nauch. tr. II Mezhdunar. nauch-prakt. conf.*, [CAD and modeling in modern electronics: collection of articles. scientific. tr. II Int. scientific-practical conf.] - Bryansk: BSTU, 2018. - Part 1. - S. 201-202.
3. Chumarov S.G., Milkin Yu.S. *Osobenosty realizacii i primeneniya programno-opredelyamyx radiosystem* [Features of the implementation and application of software-defined radio systems] // *Dinamika nelineynyx diskretnyx electrotechicheskix I electronyx system: materialy 13-oi Vseros. naych-pract. conf.* [Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems: materials of the 13th All-Russian. scientific-practical conf]. - Cheboksary: Chuvash Publishing House. University, 2019.- S. 442-443.
- Schulzeand H., Luder C. Theory and applications of OFDM and CDMA. Wideband Wireless Communications. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2005. – 421 p.
4. Schulzeand H., Luder C. Theory and applications of OFDM and CDMA. Wideband Wireless Communications. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2005. – 421 p.
5. Van Nee R., Prasad R. OFDM for Wireless Multimedia Communications. Boston: Artech House, 2000. – 279 p.
6. Savaux V. Contribution to multipath channel estimation in an OFDM modulation context. Dokt. Thesis. France. Autre. Supelec, 2013. – p 198.
7. M. G. Bakulin. *Tekhnologiya OFDM. Ychenboe posobie dlya vyzov. [OFDM technology. Textbook for universities]* / M. G. Bakulin, V. B. Kreindelin, A. M. Shloma, A. P. Shumov. - Moscow: Hotline - Telecom, 2017 - 352 p.
8. Pätzold M., Wang C.-X., Hogstad B.O. Two New Sum-of-Sinusoids-Based Methods for the Efficient Generation of Multiple Uncorrelated Rayleigh Fading Waveforms. IEEE Trans. On Commun. – 2009. Vol. 8. – № 6. – p. 3122-3131.
9. Gallager R. G. Low density parity check codes // IRE Trans. Inform. Theory. Jan. 1962. Vol. IT-8. P. 21–28.
10. C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. in Proc. IEEE Int. Commun. Conference (ICC), 1993, pp. 1064-1070.
11. Dolinar S., Divsalar D. Weight Distributions for Turbo Codes Using Random and Nonrandom Permutations, JPL TDA Progress Report, pp. 56-65, Aug. 1995

12. S. Crozier, "New high-spread high-distance interleavers for turbo-codes. In Proc. 20th Biennial Symp. on Communications. Kingston, ON, Canada, May 2000, pp. 3-7.
13. L. Dinoi and S. Benedetto. Design of prunable S-random interleavers, In Proc. Int. Symp. on Turbo Codes, Brest, France, 2003, pp. 279-282.
14. M. Ferrari, F. Scalise, and S. Bellini. Prunable S-random interleavers, In Proc. IEEE Int. Commun. Conf. (ICC), vol. 3, 2002, pp. 1711-1715.
15. V.V. Zuablov. Distancionnoe svoystvo turbocodov s razlichnymi peremezhitelyami [Distance property of turbo codes with different interleavers] / 15. V.V. Zuablov, M.A. Tsvetkov: Information Processes, Volume 3. – 2003. – № 2. – pp. 93-96.

Информация об авторах

Чумаров Сергей Геннадьевич – канд. техн. наук, заведующий кафедрой радиотехники и радиотехнических систем, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, e-mail: chumarov@mail.ru

Чернов Владимир Константинович – магистрант факультета радиоэлектроники и автоматики, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, e-mail: vovarogue@mail.ru

Authors

Sergey G. Chumarov – Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Head of the Department of Radio Engineering, I. N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, e-mail: chumarov@mail.ru

Vladimir K. Chernov – master's degree student of Radioelectronics and Automation Faculty, I. N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, e-mail: vovarogue@mail.ru

Для цитирования

Чумаров С.Г., Чернов В.К. Реализация структуры турбокода для OFDM системы // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2021. – №2(10). – С. 33-39 – DOI: 10.26731/2658-3704.2021.2(10). 33-39 – Режим доступа: <https://ismm.irgups.ru/toma/210-2021>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 29.04.2021)

For citations

Chumarov S.G., Chernov V.K. Implementation of the turbo code structure for ofdm system // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2021. No. 2. P. 33-39. DOI: 10.26731/2658-3704.2021.2(10). 33-39 [Accessed 29/04/21]