

УДК 621.391, 621.396

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-42-49>

EDN EMMZPA



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Метод ограничения пик-фактора с дополнительным сигналом компенсации в системе с ортогональным частотным разделением каналов для гауссовского канала

Фам Тхань Туан[@],
О.В. Тихонова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: anhsequayve.ru@gmail.com

Резюме

Цели. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) стало стандартом для различных систем беспроводной связи с высокой скоростью передачи данных благодаря нескольким преимуществам, одним из которых является эффективное использование полосы частот. Главным недостатком OFDM является высокое значение отношения пиковой мощности к средней мощности – пик-фактору, на что указывает повышение частоты битовых ошибок из-за нелинейности усилителя мощности. Цель статьи – оценка возможности снижения значения пик-фактора с помощью разработанного авторами метода ограничения с дополнительным сигналом компенсации в канале с белым гауссовским шумом и анализ его основных параметров.

Методы. Используются методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и компьютерного моделирования.

Результаты. Проведен анализ влияния уровня ограничения сигнала OFDM и числа дополнительных сигналов при использовании метода ограничения с дополнительным сигналом компенсации на качество (уменьшение потерь при передаче) сигнала OFDM. Получены результаты, показывающие снижение величины пик-фактора OFDM-сигнала, и зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при фиксированных значениях ограничения и числа дополнительных сигналов в канале с белым гауссовским шумом.

Выводы. Предложен метод ограничения с дополнительным сигналом при передаче OFDM-сигнала в канале с белым гауссовским шумом, обеспечивающий компенсацию потерь информации, обусловленных ограничениями уровня сигнала в канале передачи. Установлено, что увеличение уровня ограничения увеличивает величину пик-фактора, а при изменении числа дополнительных сигналов пик-фактор изменяется незначительно. Для эффективной реализации метода ограничения с дополнительным сигналом компенсации необходимо выбирать параметры уровня ограничения порогового значения и число дополнительных сигналов в зависимости от прогнозируемого отношения сигнал/шум в системе.

Ключевые слова: метод ограничения с дополнительным сигналом, пик-фактор, вероятность битовой ошибки, ортогональное частотное разделение каналов, белый гауссовский шум

• Поступила: 23.01.2024 • Доработана: 29.03.2024 • Принята к опубликованию: 12.07.2024

Для цитирования: Фам Т.Т., Тихонова О.В. Метод ограничения пик-фактора с дополнительным сигналом компенсации в системе с ортогональным частотным разделением каналов для гауссовского канала. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):42–49. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-42-49>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Method for limiting the peak factor using an additional compensation signal in a system with orthogonal frequency division multiplexing for a Gaussian channel

Pham Thanh Tuan[@],
Olga V. Tikhonova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: anhsequayve.ru@gmail.com

Abstract

Objectives. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) has become the standard for various high-speed wireless communication systems due to its several advantages, one of which is the efficient use of bandwidth. The main disadvantage of OFDM is the high peak-power-to-average-power ratio (PAPR), which is indicated by an increase in the bit error rate due to the nonlinearity of the power amplifier. The paper sets out to evaluate the possibility of reducing the PAPR value using a limitation method developed by the authors involving an additional compensation signal in a channel with white Gaussian noise, as well as to analyze its main parameters.

Methods. Statistical radio engineering and computer modeling methods are used according to optimal signal reception theory.

Results. The effect of the OFDM signal limitation level and the number of additional signals when using the limitation method with an additional compensation signal on the quality (reduction of transmission losses) of the OFDM signal is analyzed. The results show a decrease in the OFDM signal PAPR value, along with the dependencies of the bit error rate on the signal-to-noise ratio at fixed limitation values and a determined number of additional signals in the channel with white Gaussian noise.

Conclusions. The proposed limitation method with an additional signal when transmitting an OFDM signal in a channel with white Gaussian noise provides compensation for information losses due to signal level limitations in the transmission channel. Increasing the limitation level is shown to increase the PAPR value, while varying the number of additional signals changes PAPR insignificantly. In order to ensure the effective implementation of the limitation method with an additional compensation signal, the parameters of the threshold limitation level and number of additional signals should be selected depending on the predicted signal-to-noise ratio in the system.

Keywords: limitation method with additional signal, peak power to average power ratio, bit error rate, orthogonal frequency division multiplexing, white Gaussian noise

• Submitted: 23.01.2024 • Revised: 29.03.2024 • Accepted: 12.07.2024

For citation: Pham Th.T., Tikhonova O.V. Method for limiting the peak factor using an additional compensation signal in a system with orthogonal frequency division multiplexing for a Gaussian channel. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):42–49. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-42-49>

Financial disclosure: The authors have no financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) в настоящее время применяется для систем цифровой связи с высокой скоростью передачи данных [1–4], в т.ч. для высокоскоростной мобильной связи, беспроводных локальных сетей, видеовещания и высокоскоростной сотовой передачи данных. Одной из проблем, которую необходимо решить для более широкого применения системы OFDM, является уменьшение высокого значения пик-фактора, которое увеличивает вероятность битовых ошибок (ВБО) системы.

В статье оценивается возможность снижения значения пик-фактора с помощью метода ограничения с дополнительным сигналом для системы OFDM в канале с белым гауссовским шумом и изучаются основные параметры метода.

СИГНАЛ OFDM

Сигнал OFDM с дискретным временем может быть математически представлен как набор временных отсчетов сигнала после обратного дискретного преобразования Фурье:

$$S_{\text{OFDM}}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi kn/N}, \quad n = 0, N-1, \quad (1)$$

где N – количество поднесущих, $X(k)$ представляет передаваемую информацию на k -й поднесущей, n – номер отсчета сигнала OFDM, j – мнимая единица.

Для сигнала OFDM с дискретным временем $S_{\text{OFDM}}(n)$ определим величину отношения пиковой мощности к средней мощности – пик-фактора (peak-to-average power ratio, PAPR) как отношение максимальной мощности сигнала к его средней мощности [5, 6], что можно представить в виде:

$$\text{PAPR}(S_{\text{OFDM}}(n)) = \frac{\max_n |S_{\text{OFDM}}(n)|}{P_{\text{сред}} \{ |S_{\text{OFDM}}(n)|^2 \}}, \quad (2)$$

где $\max_n |S_{\text{OFDM}}(n)|$ – максимальная мощность сигнала OFDM, $P_{\text{сред}} \{ |S_{\text{OFDM}}(n)|^2 \}$ – средняя мощность

сигнала OFDM, $|S_{\text{OFDM}}(n)|$ – амплитуда n -го отсчета сигнала OFDM.

Параметр PAPR оценивает величину пик-фактора сигнала, т.е. большая его величина – высокий пик-фактор – означает большую максимальную мощность.

МЕТОД ОГРАНИЧЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ СИГНАЛОМ

Разработанный авторами метод ограничения с дополнительным сигналом для OFDM-сигнала является одним из методов снижения пик-фактора [7, 8]. В этом методе амплитуды отсчетов сигнала OFDM ограничиваются при превышении определенного порогового значения, при этом сохраняется исходная фаза n -го отсчета, что можно представить в виде:

$$S_{\text{огр}}(n) = \begin{cases} S_{\text{исх}}(n) & \text{при } |S_{\text{исх}}(n)| \leq C, \\ C e^{j\phi_n} & \text{при } |S_{\text{исх}}(n)| > C, \end{cases} \quad (3)$$

где $S_{\text{огр}}$ – сигнал после ограничения сигнала OFDM; C – пороговое значение или уровень ограничения сигнала, $|S_{\text{исх}}(n)|$ – амплитуда исходного n -го отсчета сигнала, ϕ_n – фазовый угол n -го отсчета сигнала.

В методе ограничения с дополнительным сигналом для сигнала $S_{\text{OFDM}}(n)$ проводится поиск тех позиций (номера позиций обозначим p), где амплитуда сигнала больше, чем пороговое значение C . В этом случае позиции ограничиваются в соответствии с выражением (3). При передаче сигнала, ограниченного таким образом, в некоторых позициях происходит потеря информации. Для компенсации этих потерь передаваемый сигнал $S_{\text{огр}}$ дополняется отсчетами, в которые заносится информация о номерах позиций p и дополнительные данные $S_{\text{доп}}(p)$ как разности между исходными и ограниченными отсчетами, что описывается следующим выражением:

$$S_{\text{доп}}(p) = S_{\text{исх}}(p) - S_{\text{огр}}(p). \quad (4)$$

Таким образом, в передаваемом сигнале $S_{\text{огр}}$ отсутствуют отсчеты, амплитуда которых превосходит пороговое значение C , но потери информации не происходит, т.к. имеется возможность восстановить исходные отсчеты, зная их номера p и дополнительные данные $S_{\text{доп}}(p)$.

Число дополнительных отсчетов, зарезервированных для передачи номеров позиций p и значений $S_{\text{доп}}(p)$, обозначим как число дополнительных сигналов m .

Выбор значений уровня ограничения C и числа дополнительных сигналов m важен для достижения наилучшей производительности системы. Если уровень ограничения сигнала C – значительный (большое число сигналов подвергается преобразованию (3)), а возможное число дополнительных сигналов m мало, то полной компенсации не будет, и в системе будет много битовых ошибок. Большое значение m приведет к увеличению длины передаваемой информации и тем самым – к потере энергии и мощности. При незначительном уровне ограничения C и большом значении m многие дополнительные сигналы не будут нести никакой информации, т.к. число отсчетов сигнала $S_{\text{исх}}$, превосходящих ограничение, будет незначительным.

Исследование влияния параметров уровня ограничения C и числа дополнительных сигналов m на эффективность компенсации сигнала OFDM проведено с помощью математического моделирования на основе приведенных выше формул. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1, использовался математический пакет *MATLAB*¹. При заданных значениях C и m сигналы OFDM модифицируются с использованием метода ограничения с дополнительным сигналом, а затем передаются через канал с белым гауссовским шумом. На приемной

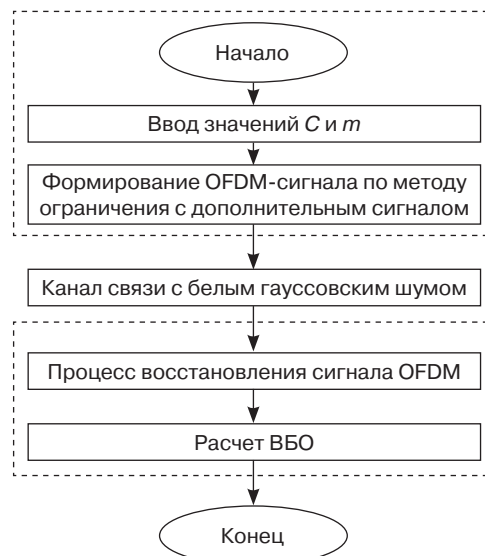


Рис. 1. Блок-схема алгоритма моделирования влияния параметров C и m на качество компенсации сигнала OFDM

стороне выполняется процесс восстановления сигнала OFDM (его демодуляция с учетом дополнительной компенсирующей информации), затем полученный массив данных сравнивается с исходным массивом для получения значения ВБО.

Блок-схема алгоритма расчета пик-фактора представлена на рис. 2. Результаты получены для двух случаев. В первом случае при фиксированной величине $m = 16$ для каждого значения C сигналы OFDM имеют ограничение в соответствии с (3);

¹ <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Дата обращения 29.03.2024. / Accessed March 29, 2024.

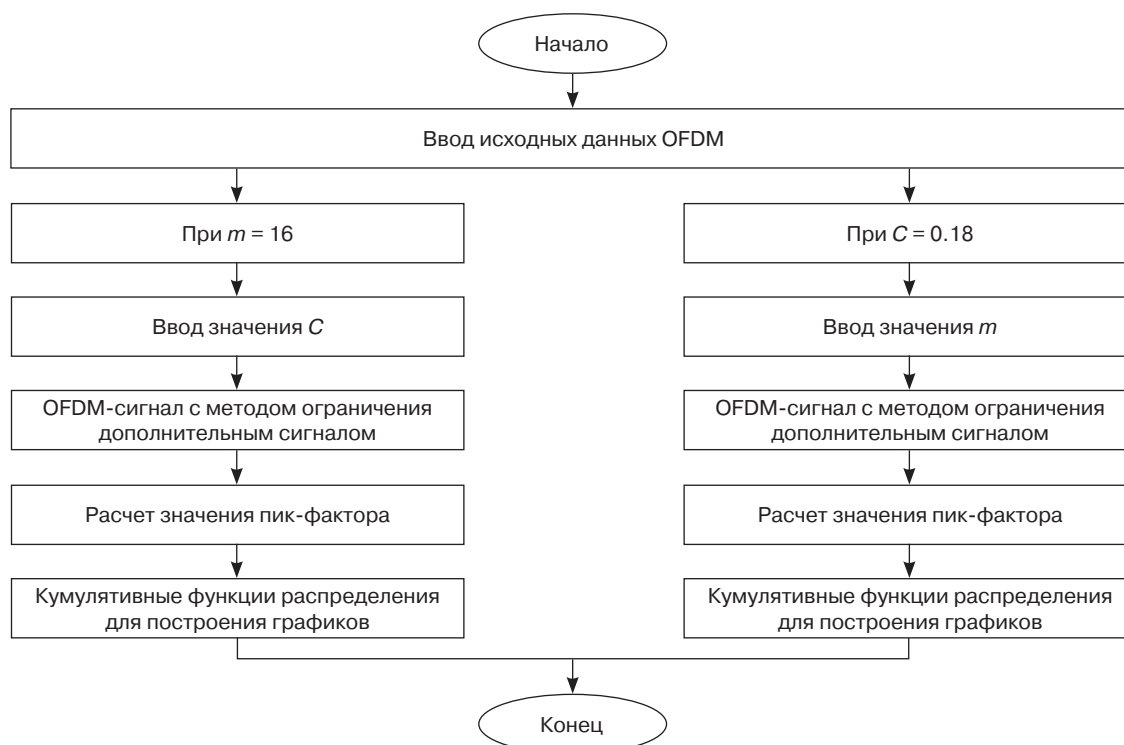


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета пик-фактора

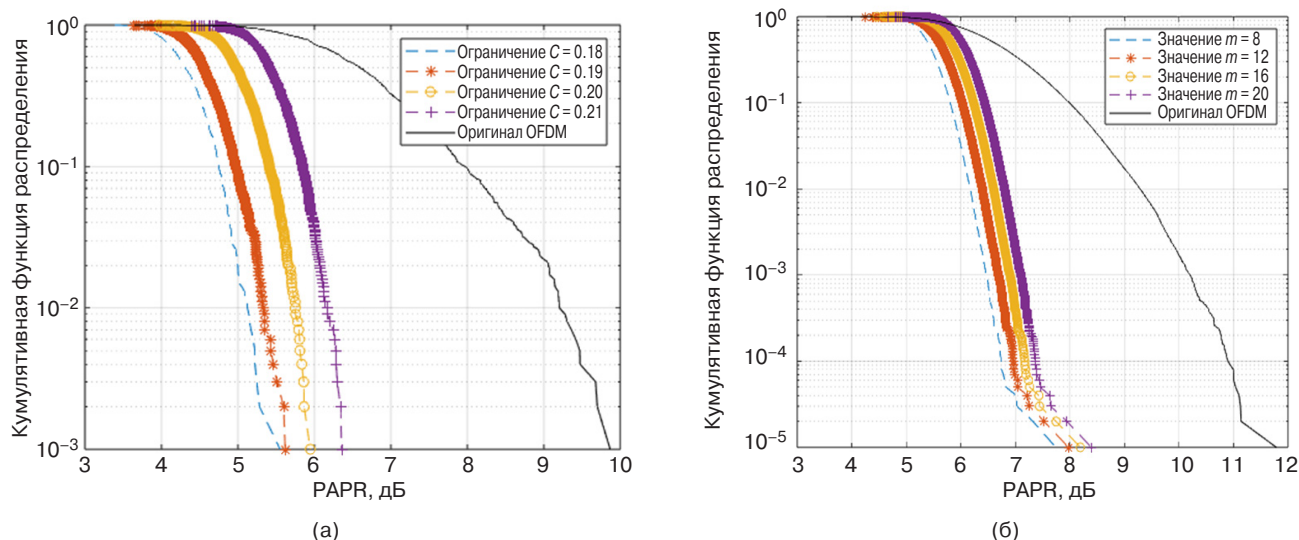


Рис. 3. Результаты снижения пик-фактора сигнала OFDM методом ограничения с дополнительным сигналом: (а) при $m = 16$, (б) при $C = 0.18$

в этом случае значение пик-фактора после ограничения сигнала OFDM рассчитывалось по формуле (2). Во втором случае при фиксированной величине $C = 0.18$ для каждого значения m проведены аналогичные расчеты. Полученные зависимости пик-фактора показаны на рис. 3а и 3б.

В результате моделирования оценено изменение величины ВБО при изменении уровня ограничения C и фиксированном m и аналогично получены зависимости ВБО при изменении значения m при фиксированном уровне C . В модели при $N = 64$ поднесущих максимальная амплитуда OFDM-сигнала равнялась 0.4229 (безразмерная величина, нормированная к 1 В), поэтому значения C выбирались меньше этой величины.

Оценено снижение пиковой мощности сигнала OFDM при ограничении с дополнительным сигналом при различных значениях параметров C и m с помощью параметра пик-фактора из соотношения (2). Для оценки эффективности снижения пик-фактора использована кумулятивная функция распределения, указывающая вероятность того, что пик-фактор сигнала OFDM превысит заданный пороговый уровень $PAPR_0$.

На рис. 3а представлены результаты снижения пик-фактора с числом дополнительных сигналов $m = 16$ при различных значениях C , а на рис. 3б – результаты снижения пик-фактора при пороговом значении $C = 0.18$ при варьировании m .

Из рис. 3 видно, что при сохранении числа дополнительных сигналов m чем сильнее ограничение (величина C мала), тем меньше значение пик-фактора. При сохранении порогового значения и изменении числа дополнительных сигналов значение пик-фактора меняется незначительно.

Основным параметром, определяющим качество системы цифровой связи, является ВБО при восстановлении сигнала. Чтобы оценить производительность системы OFDM, необходимо оценить величину ВБО в зависимости от трех основных параметров: величины ограничения C , числа дополнительных сигналов m и отношения сигнал/шум (ОСШ) – отношение мощности сигнала к мощности шума в полосе пропускания) при наличии в канале белого гауссовского шума [9–11].

На рис. 4 представлены результаты расчета ВБО, которые определялись при модуляции 16-QAM сигнала OFDM в гауссовском канале при фиксации порогового значения $C = 0.18$ с различными значениями m в зависимости от уровня шумов. Для сравнения проведена оценка ВБО для стандартного метода ограничения OFDM [12–18].

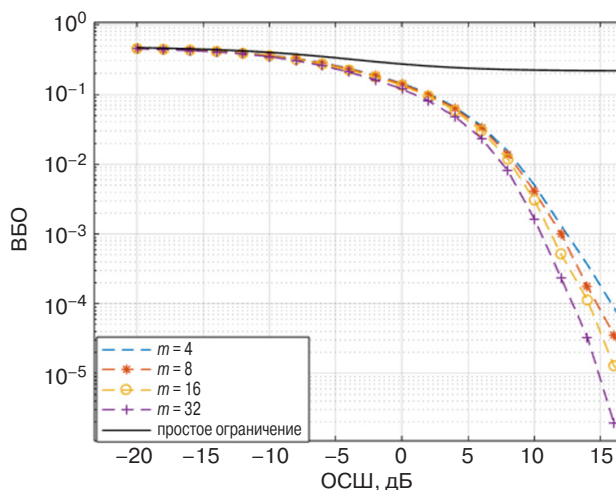


Рис. 4. Зависимость ВБО от ОСШ при фиксированном значении $C = 0.18$

Из рис. 4 видно преимущество метода ограничения с дополнительным сигналом (при уровне ограничения $C = 0.18$, когда максимальная амплитуда неограниченного сигнала равна 0.4229) перед стандартным методом ограничения пик-фактора. При увеличении значения m ВБО уменьшается.

На рис. 5 представлены результаты расчета ВБО при фиксированном числе дополнительных сигналов $m = 16$ с различными величинами порога ограничения C в зависимости от уровня шумов.

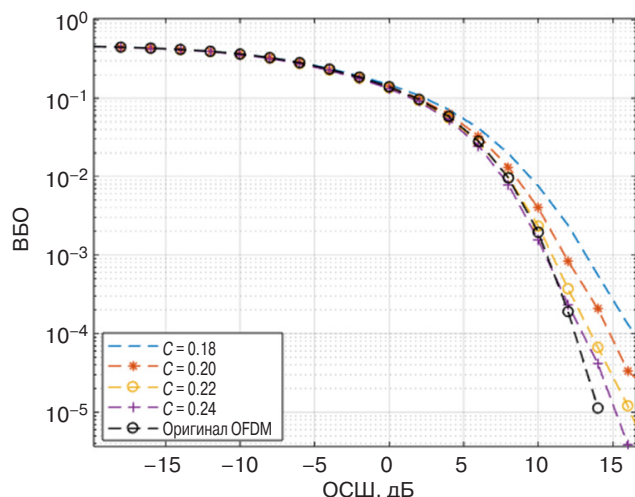
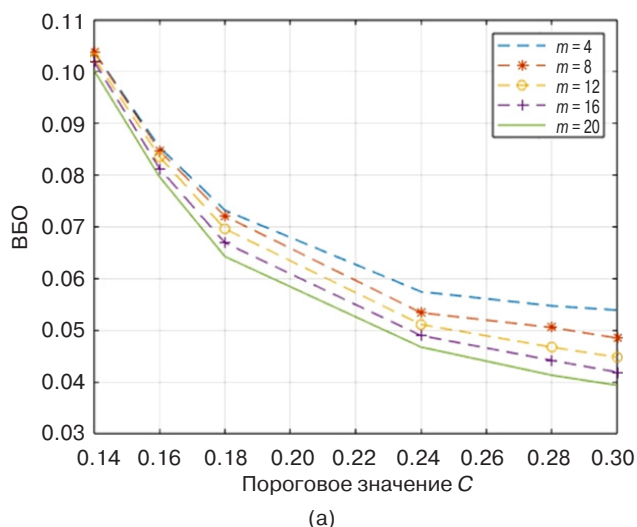


Рис. 5. Зависимость ВБО от ОСШ при фиксированном значении $m = 16$

Из рис. 5 видно, что при увеличении уровня ограничения C уменьшается ВБО. Для сравнения приведены результаты для сигнала OFDM без ограничений (оригинал OFDM). Они, естественно, лучше, но их аппаратная реализация физически неосуществима.



На рис. 6а и 6б приведены зависимости ВБО от порогового значения в гауссовском канале при ОСШ = 10 дБ и ОСШ = 15 дБ.

Анализ полученных результатов показывают, что ВБО снижается при увеличении уровня ограничения C и числа дополнительных сигналов m .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования метода ограничения с дополнительным сигналом компенсации для OFDM-сигнала в канале с белым гауссовским шумом и анализ основных его параметров позволили сделать следующие выводы:

1. При большем уровне ограничений C пик-фактор сигнала уменьшается, а при изменении числа дополнительных сигналов m пик-фактор изменяется незначительно.
2. В канале с белым гауссовским шумом для эффективной реализации метода ограничения с дополнительным сигналом компенсации необходимо выбирать уровень ограничения C и число дополнительных сигналов m в зависимости от прогнозируемого ОСШ в системе.

Вклад авторов

Т.Т. Фам – проведение расчетов, обработка результатов.

О.В. Тихонова – идея исследования, консультации по вопросам проведения всех этапов исследования.

Authors' contributions

Th.T. Pham – making calculations, processing the results.

O.V. Tikhonova – the research idea, consultations on the issues of conducting all stages of the study.

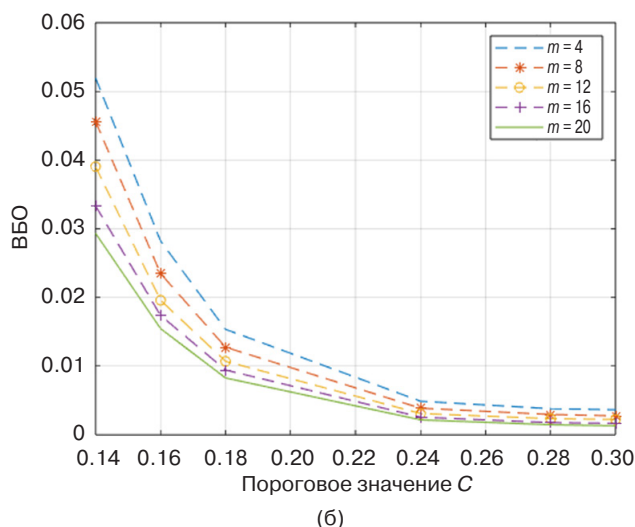


Рис. 6. Зависимость ВБО от уровня ограничения C :
(а) ОСШ = 10 дБ, (б) ОСШ = 15 дБ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев В.В., Селецкая О.Ю., Покаместов Д.А. Формирование и обработка OFDM сигналов. *Молодой ученый*. 2016;14(118):151–154. URL: <https://moluch.ru/archive/118/32800/>
2. Галустов Г.Г., Мелешкин С.Н. *Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов*: учебное пособие. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ; 2012. 80 с.
3. Van Nee R., Prasad R. *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Boston; London: Artech House; 2000. 260 p.
4. Wu Y., Zou W.Y. Orthogonal frequency division multiplexing: A multi-carrier modulation scheme. *IEEE Trans. Consumer Electronics*. 1995;41(3):392–399.
5. Луферчик П.В., Конев А.Н., Богатырев Е.В., Галеев Р.Г. Методы повышения энергетической эффективности OFDM модемов в каналах связи с частотно-селективными замираниями. *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2022;23(2):189–196. <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196>
6. Hassan G.M., Mukred M., Gumaei A.H. Modified Method of PAPR Reduction using Clipping and Filtering for Image Transmission with OFDM. *Al-Mustansiriyah Journal of Science*. 2023;34(4):75–86. <https://doi.org/10.23851/mjs.v34i4.1400>
7. Фам Т.Т., Тихонова О.В. Метод ограничения с дополнительным сигналом для уменьшения значения пик-фактора в системе с ортогональным частотным разделением каналов. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. 2023;193(2):34–38.
8. Фам Т.Т., Тихонова О.В. Метод ограничения пик-фактора сигнала OFDM с дополнительным сигналом. В сб.: Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «Радиоинформ-2023»: Сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции. М.: РТУ МИРЭА; 2023. С. 140–142.
9. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*: пер. с англ. М.: Вильямс; 2017. 1104 с.
10. Прохис Дж. *Цифровая связь*: пер. с англ.; под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь; 2000. 800 с.
11. Bairwa M.K., Porwal M.K. BER Performance of OFDM System over AWGN channel with Different Modulation Schemes. *Int. J. Eng. Tech. Res. (IJETR)*. 2014;2(8):117–119.
12. Shatrughna P.Y., Subhash C.B. PAPR Reduction using Clipping and Filtering Technique for Nonlinear Communication Systems. In: *International Conference on Computing, Communication and Automation*. IEEE; 2015. P. 1220–1225. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2015.7148590>
13. Kannadhasan S., Karthikeyan G., Indumathi G. PAPR Reduction in OFDM Systems using Adaptive Active Constellation Extension Algorithm. *Int. J. Innov. Res. Computer and Commun. Eng. (IJIRCCE)*. 2013;1(4):950–957.
14. Пукса А.О. Уменьшение пик-фактора OFDM-сигнала с помощью методов, основанных на ограничении сигналов. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017;12(66):124–127. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.145>
15. Wang L., Tellambura C. A simplified clipping and filtering technique for PAPR reduction in OFDM systems. *IEEE Signal Processing Letters*. 2005;12(6):453–456. <https://doi.org/10.1109/LSP.2005.847886>
16. Tellambura C., Jayalath A.D.S. PAR reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences. In: *IEEE 54th Vehicular Technology Conference. VTC Fall 2001. Proceedings*. IEEE; 2001. P. 465–469. <https://doi.org/10.1109/VTC.2001.956642>
17. Kumar P., Ahuja A.K., Chakka R. BCH/hamming/cyclic coding techniques: comparison of PAPR-reduction performance in OFDM systems. In: *International Conference on Intelligent Computing and Applications*. Springer; 2018. P. 557–566. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5520-1_50
18. Han S.H., Lee J.H. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission. *IEEE Wireless Commun.* 2005;12(2):56–65. <https://doi.org/10.1109/MWC.2005.1421929>

REFERENCES

1. Kovalev V.V., Seletskaia O.Yu., Pokamestov D.A. Formation and processing of OFDM signals. *Molodoi uchenyi = Young scientist*. 2016;14(118):151–154 (in Russ.). Available from URL: <https://moluch.ru/archive/118/32800/>
2. Galustov G.G., Meleshkin S.N. *Mul'tipleksirovanie s ortogonal'nym chastotnym razdeleniem signalov (Multiplexing with Orthogonal Frequency Division of Signals)*: textbook. Taganrog: TTI SFU; 2012. 80 p. (in Russ.).
3. Van Nee R., Prasad R. *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Boston; London: Artech House; 2000. 260 p.
4. Wu Y., Zou W.Y. Orthogonal frequency division multiplexing: A multi-carrier modulation scheme. *IEEE Trans. Consumer Electronics*. 1995;41(3):392–399.
5. Luferchik P.V., Konev A.N., Bogatyrev E.V., Galeev R.G. Methods for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading communication channels. *Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal = Siberian Aerospace Journal*. 2022;23(2):189–196 (in Russ.). <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196>
6. Hassan G.M., Mukred M., Gumaei A.H. Modified Method of PAPR Reduction using Clipping and Filtering for Image Transmission with OFDM. *Al-Mustansiriyah Journal of Science*. 2023;34(4):75–86. <https://doi.org/10.23851/mjs.v34i4.1400>
7. Pham Th.T., Tikhonova O.V. Limitation method with an additional signal to PAPR reduction in the system with orthogonal frequency division of channels. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEEM = Electromechanical Matters. VNIIEEM Studies*. 2023;193(2):34–38 (in Russ.).

8. Pham Th.T., Tikhonova O.V. Method for limiting the peak factor of an OFDM signal with an additional signal. In: *Actual Problems and Prospects for the Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems Radioinfocom-2023: Collection of Scientific Articles of the 7th International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2023. P. 140–142 (in Russ.).
9. Sklar B. Tsifrovaya svyaz'. *Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye (Digital Communication. Theoretical Foundations and Practical Application)*: transl. from Engl. Moscow: Vil'yams; 2017. 1100 p. (in Russ.). [Sklar B. *Digital Communication: Fundamentals and Applications*. Prentice-Hall PTR; 2001. 1079 p.]
10. Proakis J. Tsifrovaya svyaz' (Digital Communication): transl. from Engl. Moscow: Radio i svyaz'; 2000. 800 p. (in Russ.). [Proakis J. *Digital Communications*. N.Y.: McGraw-Hill Publ.; 1995. 928 p.]
11. Bairwa M.K., Porwal M.K. BER Performance of OFDM System over AWGN channel with Different Modulation Schemes. *Int. J. Eng. Tech. Res. (IJETR)*. 2014;2(8):117–119.
12. Shatrughna P.Y., Subhash C.B. PAPR Reduction using Clipping and Filtering Technique for Nonlinear Communication Systems. In: *International Conference on Computing, Communication and Automation*. IEEE; 2015. P. 1220–1225. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2015.7148590>
13. Kannadhasan S., Karthikeyan G., Indumathi G. PAPR Reduction in OFDM Systems using Adaptive Active Constellation Extension Algorithm. *Int. J. Innov. Res. Computer and Commun. Eng. (IJIRCCE)*. 2013;1(4):950–957.
14. Puksa A.O. Reduction of peak-factor of OFDM signal by methods based on signal limitation. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = Int. Res. J.* 2017;12(66):124–127 (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.145>
15. Wang L., Tellambura C. A simplified clipping and filtering technique for PAPR reduction in OFDM systems. *IEEE Signal Processing Letters*. 2005;12(6):453–456. <https://doi.org/10.1109/LSP.2005.847886>
16. Tellambura C., Jayalath A.D.S. PAR reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences. In: *IEEE 54th Vehicular Technology Conference. NTC Fall 2001. Proceedings*. IEEE; 2001. P. 465–469. <https://doi.org/10.1109/VTC.2001.956642>
17. Kumar P., Ahuja A.K., Chakka R. BCH/hamming/cyclic coding techniques: comparison of PAPR-reduction performance in OFDM systems. In: *International Conference on Intelligent Computing and Applications*. Springer; 2018. P. 557–566. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5520-1_50
18. Han S.H., Lee J.H. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission. *IEEE Wireless Commun.* 2005;12(2):56–65. <https://doi.org/10.1109/MWC.2005.1421929>

Об авторах

Фам Тхань Туан, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: anhsequayve.ru@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0000-7430-1779>

Тихонова Ольга Вадимовна, д.т.н., старший научный сотрудник, профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: o_tikhonova@inbox.ru. Scopus Author ID 57208923772, SPIN-код РИНЦ 3362-9924, <https://orcid.org/0009-0009-4013-9182>

About the authors

Pham Thanh Tuan, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: anhsequayve.ru@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0000-7430-1779>

Olga V. Tikhonova, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: o_tikhonova@inbox.ru. Scopus Author ID 57208923772, RSCI SPIN-code 3362-9924, <https://orcid.org/0009-0009-4013-9182>