

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.391

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-6-78-85>

EDN GBSHAL



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Метод ограничения пик-фактора с дополнительным сигналом компенсации в системе с ортогональным частотным разделением каналов при применении регрессии для выбора параметров

О.В. Тихонова[@], А.И. Стариковский, Фам Тхань Туан

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: o_tikhonova@inbox.ru

• Поступила: 17.04.2025 • Доработана: 04.06.2025 • Принята к опубликованию: 08.10.2025

Резюме

Цели. Целью статьи является исследование разработанного авторами метода ограничения пик-фактора с дополнительным сигналом в системе связи с мультиплексированием с ортогональным частотным разделением каналов (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) при использовании полиномиальной регрессии для выбора параметров метода.

Методы. В работе использованы методы статистической радиотехники, математического моделирования для аппроксимации зависимости вероятности битовой ошибки от величины уровня ограничения и числа дополнительных сигналов при использовании полиномиальной регрессии.

Результаты. Разработан алгоритм выбора параметров метода ограничения пик-фактора с дополнительным сигналом в системе связи с мультиплексированием с ортогональным частотным разделением каналов на основе полиномиальной регрессии, позволяющий оперативно оценивать характеристики системы без дополнительных затрат времени на математическое моделирование. Это значительно упрощает выбор оптимального уровня ограничения и числа дополнительных сигналов без выполнения полного цикла моделирования для каждой конфигурации. Моделирование и аналитические расчеты подтвердили, что увеличение уровня ограничения способствует снижению вероятности битовой ошибки, а увеличение числа дополнительных сигналов улучшает точность ограничения, однако вызывает рост вычислительных затрат. Оптимальный выбор параметров позволяет достичь компромисса между снижением пик-фактора и сохранением качества сигнала. Также установлено, что при фиксированном уровне ограничения существует оптимальное значение числа дополнительных сигналов, обеспечивающее наилучшее соотношение между вероятностью ошибки и снижением пиковых значений.

Выводы. Предложенный подход позволяет сократить время расчетов более чем в 5 раз, обеспечивая гибкость и адаптивность при проектировании OFDM-систем с ограничением пиковых значений.

Ключевые слова: метод ограничения с дополнительным сигналом, OFDM-сигнал, пик-фактор, метод снижения пик-фактора, полиномиальная регрессия

Для цитирования: Тихонова О.В., Стариковский А.И., Фам Т.Т. Метод ограничения пик-фактора с дополнительным сигналом компенсации в системе с ортогональным частотным разделением каналов при применении регрессии для выбора параметров. *Russian Technological Journal*. 2025;13(6):78–85. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-6-78-85>, <https://www.elibrary.ru/GBSHAL>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Method of peak factor reduction with compensation signal in OFDM system using regression for parameter selection

Olga V. Tikhonova [@], **Anatoly I. Starikovskiy**, **Pham Thanh Tuan**

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] *Corresponding author, e-mail: o_tikhonova@inbox.ru*

• **Submitted:** 17.04.2025 • **Revised:** 04.06.2025 • **Accepted:** 08.10.2025

Abstract

Objectives. The article aims to investigate the authors' developed peak-to-average power ratio (PAPR) reduction method using an additional compensation signal in orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) systems, employing polynomial regression for method parameter selection.

Methods. The study utilizes statistical radio technique methods and mathematical modeling to approximate the relationship between bit error rate (BER) versus clipping threshold level and number of additional signals using polynomial regression analysis.

Results. We developed an algorithm for parameter selection in the PAPR reduction method with an additional compensation signal for OFDM systems using polynomial regression. This approach enables rapid system performance evaluation without additional computational overhead for mathematical modeling. The method significantly simplifies the optimization of clipping threshold and number of additional signals, eliminating the need for complete simulation cycles for each configuration. Both simulation and analytical calculations confirm that increasing the clipping threshold reduces BER, while increasing the number of additional signals improves clipping accuracy at the cost of higher computational complexity. Optimal parameter selection achieves a compromise between PAPR reduction and signal quality preservation. Furthermore, we established that for a fixed clipping threshold, there exists an optimal number of additional signals providing the best trade-off between error probability and peak value reduction.

Conclusions. An algorithm for selecting the parameters of the clipping method with an additional compensation signal based on polynomial regression has been developed. This algorithm enables real-time evaluation of system characteristics without additional computational costs associated with repeated mathematical modeling. The proposed approach reduces calculation time by more than a factor of five, offering flexibility and adaptability in the design of OFDM systems with PAPR reduction.

Keywords: method of peak factor reduction with compensation additional signal, OFDM signal, peak-to-average power ratio, PAPR reduction method, polynomial regression

For citation: Tikhonova O.V., Starikovskiy A.I., Pham Th.T. Method of peak factor reduction with compensation signal in OFDM system using regression for parameter selection. *Russian Technological Journal*. 2025;13(6):78–85. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-6-78-85>, <https://www.elibrary.ru/GBSHAL>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В беспроводных системах связи модуляция является важной составляющей, необходимой для эффективной передачи информации и уменьшения влияния помех. Одним из современных и широко используемых методов модуляции является мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) [1–5]. Данный метод модуляции решает ключевые проблемы, обеспечивая высокую скорость передачи данных, снижение вероятности битовой ошибки (bit error rate, BER) [6, 7] и эффективное использование полосы пропускания. Однако одной из основных проблем OFDM является высокое отношение пиковой мощности сигнала к средней (peak-to-average power ratio, PAPR). Разработка эффективных методов снижения PAPR крайне важна для повышения производительности и удобства использования системы. Одним из таких методов является метод ограничения пик-фактора дополнительным сигналом (МОДС), разработанный авторами. Этот метод имеет два основных параметра: заданный уровень ограничения C и число дополнительных сигналов m , значения которых влияют на эффективность метода. Исследование и оценка этих параметров крайне важны для применения МОДС в конкретных случаях.

В данной статье рассматривается выбор параметров МОДС при использовании полиномиальной регрессии.

СИГНАЛ OFDM

Дискретный OFDM-сигнал может быть математически представлен в виде:

$$L_{\text{OFDM}}(v) = \frac{1}{H} \sum_{g=0}^{H-1} K(g) e^{j2\pi gv/H}, \quad v = \overline{0, H-1}, \quad (1)$$

где H – количество поднесущих, $K(g)$ – передаваемая информация на g -й поднесущей, v – номер отсчета сигнала OFDM, j – мнимая единица.

Для сигнала OFDM с дискретным временем определим величину пик-фактора как отношение

максимальной мощности сигнала к его средней мощности [8–12], что можно представить в виде:

$$\text{PAPR}(L_{\text{OFDM}}(v)) = \frac{P_{\text{макс}} \{ |L_{\text{OFDM}}(v)|^2 \}}{P_{\text{сред}} \{ |L_{\text{OFDM}}(v)|^2 \}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{макс}} \{ |L_{\text{OFDM}}(v)|^2 \}$ – максимальная мощность OFDM-сигнала, $P_{\text{сред}} \{ |L_{\text{OFDM}}(v)|^2 \}$ – средняя мощность OFDM-сигнала, $|L_{\text{OFDM}}(v)|$ – амплитуда v -го отсчета OFDM-сигнала.

При использовании этого метода амплитуда сигнала OFDM ограничивается определенным пороговым значением, при этом сохраняется исходная фаза каждого рассматриваемого отсчета, что можно выразить как:

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

где C – уровень ограничения, $|L_{\text{исх}}(v)|$ – амплитуда исходного отсчета сигнала, ϕ_n – фазовый угол исходного отсчета сигнала.

Для сигнала $L_{\text{OFDM}}(v)$ проводится поиск тех позиций (номера позиций обозначим q), где амплитуда сигнала больше, чем уровень ограничения C . При передаче данных с ограничением сигнала таким образом в некоторых его позициях происходит потеря информации. Для компенсации этих потерь передаваемый сигнал $L_{\text{огр}}$ дополняется отсчетами, в которые заносится информация о позиции q и добавляются сигналы $L_{\text{доп}}(q)$ – разности между исходными и ограниченными сигналами [13–15]:

$$L_{\text{доп}}(q) = L_{\text{исх}}(q) - L_{\text{огр}}(q). \quad (4)$$

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

дополнительных отсчетов, зарезервированных для передачи номеров позиций q и значений $L_{\text{доп}}(q)$, обозначим m .

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ

В методе ограничения пик-фактора с дополнительным сигналом вероятность битовой ошибки зависит не только от отношения сигнал-шум (signal-to-noise ratio, SNR), но и от параметров метода – уровня ограничения C и количества зарезервированных дополнительных отсчетов m [16]. Оптимизацию этих параметров путем математического моделирования можно упростить, аппроксимируя результаты моделирования полиномиальными кривыми, построенными на основе предварительно полученных данных.

Полиномиальная регрессия n -й степени описывается выражением [17]:

$$z = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_nx^n, \quad (5)$$

где $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ – коэффициенты регрессии, подлежащие определению.

Процедура определения коэффициентов включает следующие этапы:

Шаг 1. Формирование исходного набора данных – пар точек $(x_1, z_1), (x_2, z_2), \dots, (x_k, z_k)$, принадлежащих графику, полученному методом математического моделирования.

Шаг 2. Определение степени полинома n в соответствии с выражением (5).

Шаг 3. Построение системы уравнений.

Система линейных уравнений формируется на основе исходных данных для нахождения коэффициентов. Каждая точка данных порождает уравнение вида:

$$\begin{cases} b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + \dots + b_nx_1^n = z_1, \\ b_0 + b_1x_2 + b_2x_2^2 + \dots + b_nx_2^n = z_2, \\ \dots \\ b_0 + b_1x_k + b_2x_k^2 + \dots + b_nx_k^n = z_k. \end{cases} \quad (6)$$

В матричной форме система уравнений записывается как:

$$\begin{pmatrix} 1 & \dots & x_1^n \\ 1 & \dots & x_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \dots & x_k^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_k \end{pmatrix}, \quad (7)$$

или $\mathbf{G} \cdot \mathbf{b} = \mathbf{z}$.

Шаг 4. Решение системы уравнений для определения коэффициентов $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$.

Решение находится методом наименьших квадратов:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{z}. \quad (8)$$

На рис. 1 представлена зависимость BER от уровня ограничения C при SNR = 10 дБ и $m = 16$, полученная в результате моделирования.

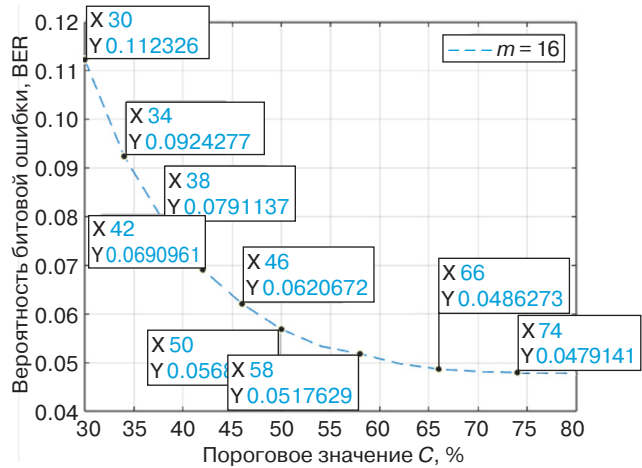


Рис. 1. Численные значения зависимости BER от уровня ограничения C при SNR = 10 дБ и $m = 16$ (метод моделирования)

Анализ графика демонстрирует снижение величины BER с увеличением уровня ограничения C .

На рис. 2 представлены кривая BER и данные, полученные методом полиномиальной регрессии:

$$p(C) = 0.5609 - 0.0287 \cdot C + 6.1966 \cdot 10^{-4} \cdot C^2 - 6.0957 \cdot 10^{-6} \cdot C^3 + 2.2886 \cdot 10^{-8} \cdot C^4.$$

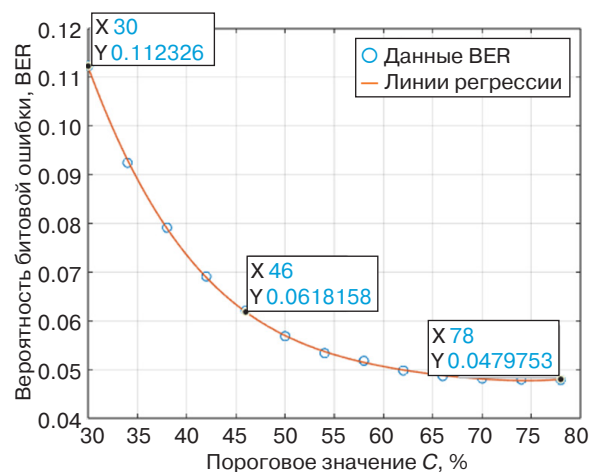


Рис. 2. Численные значения зависимости BER от уровня ограничения C (метод регрессии)

Анализ рис. 1 и 2 подтверждает полное соответствие между результатами моделирования и аппроксимации. Использование предварительно рассчитанных коэффициентов полиномиальной регрессии позволяет существенно сократить объем вычислительных операций при анализе параметров МОДС.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

А. Отношение сигнал-шум равно 5 дБ

На рис. 3 показаны зависимости BER от уровня ограничения C при SNR = 5 дБ для различных значений m , полученные моделированием.

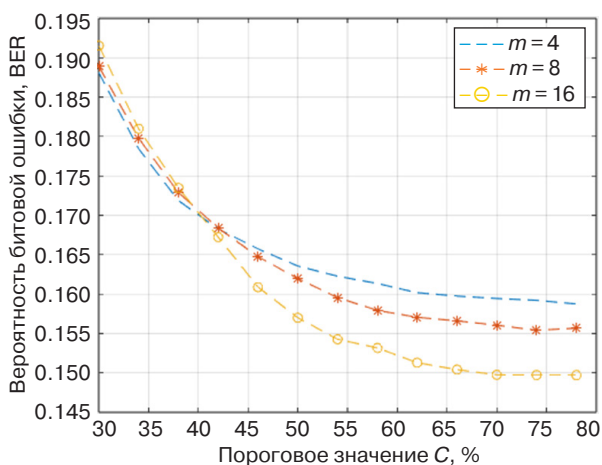


Рис. 3. Зависимость BER от уровня ограничения C (моделирование)

На рис. 4 представлены соответствующие зависимости, рассчитанные методом регрессии.

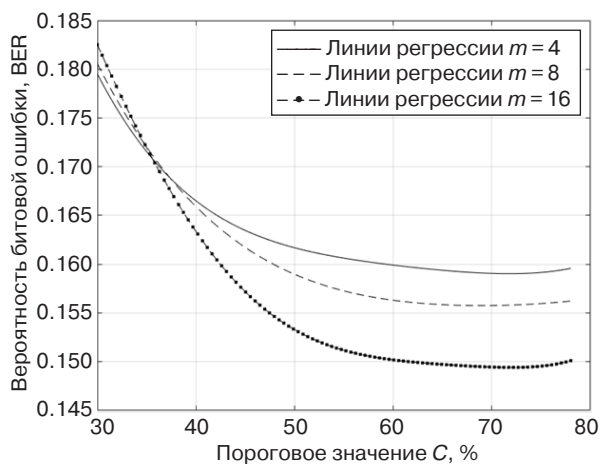


Рис. 4. Зависимость BER от уровня ограничения C (метод регрессии)

Уравнения регрессионных кривых для $m = 4, 8, 16$:

$$p_1(C) = 0.4517 - 0.018 \cdot C + 4.2528 \cdot 10^{-4} \cdot C^2 - 4.5383 \cdot 10^{-6} \cdot C^3 + 1.8219 \cdot 10^{-8} \cdot C^4,$$

$$p_2(C) = 0.3818 - 0.0121 \cdot C + 2.543 \cdot 10^{-4} \cdot C^2 - 2.4828 \cdot 10^{-6} \cdot C^3 + 9.3811 \cdot 10^{-9} \cdot C^4,$$

$$p_3(C) = 0.4517 - 0.018 \cdot C + 4.2528 \cdot 10^{-4} \cdot C^2 - 4.5383 \cdot 10^{-6} \cdot C^3 + 1.8219 \cdot 10^{-8} \cdot C^4.$$

Б. Отношение сигнал-шум равно 10 дБ

На рис. 5 изображены зависимости BER от уровня ограничения C при SNR = 10 дБ для различных m , полученные моделированием.

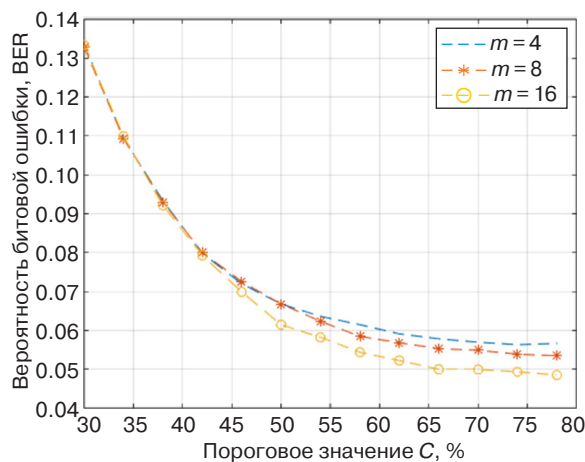


Рис. 5. Зависимость BER от уровня ограничения C (моделирование)

Соответствующие регрессионные зависимости представлены на рис. 6.

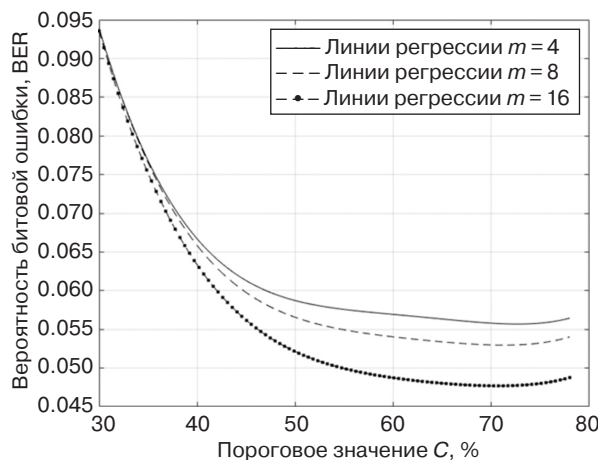


Рис. 6. Зависимость BER от уровня ограничения C (метод регрессии)

Уравнения регрессионных кривых для $m = 4, 8, 16$:

$$p_1(C) = 0.741356 - 0.03974 \cdot C + 8.8787 \cdot 10^{-4} \cdot C^2 - 8.973 \cdot 10^{-6} \cdot C^3 + 3.355 \cdot 10^{-8} \cdot C^4,$$

$$p_2(C) = 0.67576 - 0.0348 \cdot C + 7.5598 \cdot 10^{-4} \cdot C^2 - 7.4855 \cdot 10^{-6} \cdot C^3 + 2.8257 \cdot 10^{-8} \cdot C^4,$$

$$p_3(C) = 0.61 - 0.0289 \cdot C + 5.701 \cdot 10^{-4} \cdot C^2 - 5.1075 \cdot 10^{-6} \cdot C^3 + 1.744 \cdot 10^{-8} \cdot C^4.$$

В. Отношение сигнал-шум равно 15 дБ

На рис. 7 и 8 показаны зависимости BER для SNR = 15 дБ, полученные соответственно моделированием и методом регрессии.

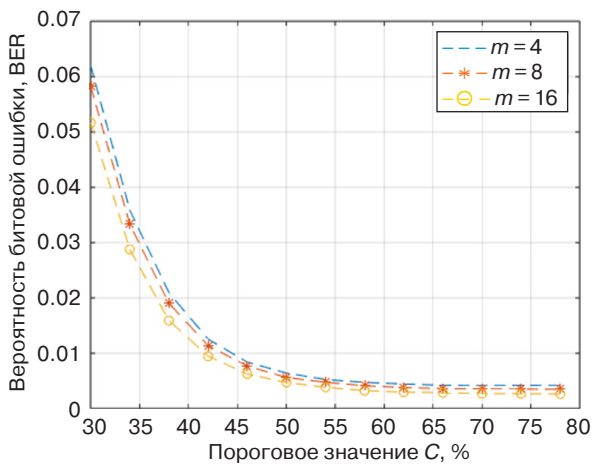


Рис. 7. Зависимость BER от уровня ограничения C (моделирование)

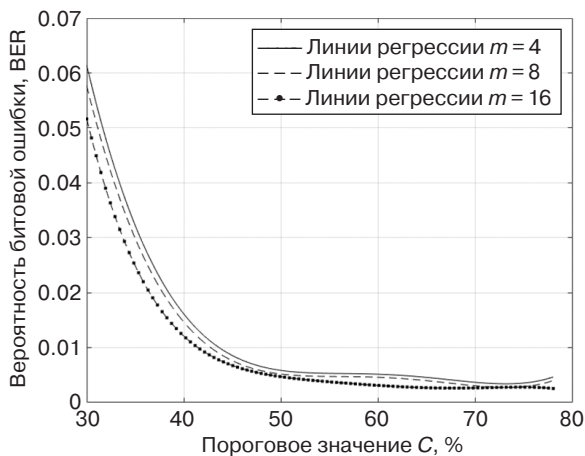


Рис. 8. Зависимость BER от уровня ограничения C (метод регрессии)

Уравнения регрессионных кривых:

$$p_1(C) = 0.8899 - 0.0584 \cdot C + 0.0014 \cdot C^2 - 1.5618 \cdot 10^{-5} \cdot C^3 + 6.3155 \cdot 10^{-8} \cdot C^4,$$

$$p_2(C) = 0.859 - 0.0567 \cdot C + 0.0014 \cdot C^2 - 1.5295 \cdot 10^{-5} \cdot C^3 + 6.2075 \cdot 10^{-8} \cdot C^4,$$

$$p_3(C) = 0.8003 - 0.0533 \cdot C + 0.0013 \cdot C^2 - 1.4625 \cdot 10^{-5} \cdot C^3 + 5.9732 \cdot 10^{-8} \cdot C^4.$$

Сравнительный анализ рис. 3–8 подтверждает идентичность результатов, полученных методами моделирования и полиномиальной регрессии при различных значениях SNR.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование параметров метода ограничения пик-фактора с дополнительным сигналом в OFDM-системах показало, что эффективность метода существенно зависит от оптимального выбора уровня ограничения C и количества дополнительных сигналов m , причем эти параметры взаимосвязаны.

При заданном SNR применение полиномиальной регрессии позволяет осуществлять оценку и оптимизацию параметров C и m посредством аппроксимационных кривых без проведения полномасштабного моделирования. Данный подход значительно сокращает временные затраты на проектирование и повышает гибкость настройки системы. Оптимизация параметров C и m обеспечивает эффективное снижение пик-фактора системы.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка адаптивных алгоритмов выбора параметров в зависимости от характеристик канала и требований к качеству передачи, а также сравнительный анализ с современными методами оптимизации.

Вклад авторов

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

А.И. Стариковский – обработка результатов.

Т.Т. Фам – проведение компьютерных расчетов.

Authors' contributions

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

A.I. Starikovskiy – processing the results.

Th.T. Pham – conducting computer calculations.

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/>. Дата обращения 17.12.2023.
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. Склар Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*: пер. с англ. М.: Вильямс; 2017. 1104 с.
7. Проакис Дж. *Цифровая связь*: пер. с англ.; под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь; 2000. 800 с.
8. 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>
9. 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>
10. Tripathi V., Patel P., Jain P.K., Shukla S. Peak-to-average power ratio reduction of orthogonal frequency division multiplexing signals using improved salp swarm optimization-based partial transmit sequence model. *ETRI Journal*. 2025;47(2):256–269. <https://doi.org/10.4218/etrij.2023-0347>
11. 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>
12. Oman B.O., Majeed Y.E., Ahmad I. Peak to average power ratio reduction in spectrally efficient FDM using repeated clipping and filtering. *Indonesian J. Electric. Eng. Computer Sci*. 2023;30(2):993–1001. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v30.i2.pp993-1001>
13. 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>
14. 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.
15. 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. «Радиоинфоком-2023»*: Сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции. М.: РТУ МИРЭА; 2023. С. 140–142.
16. Фам Т.Т., Тихонова О.В. Алгоритм выбора параметров метода ограничения с дополнительным сигналом в системе с ортогональным частотным разделением каналов. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. 2024;199(2):52–55.
17. Шорохова И.С., Кисляк Н.В., Мариев О.С. *Статистические методы анализа*. Саратов, Екатеринбург: Изд-во Профобразование, Уральский федеральный университет; 2024. 298 с. ISBN 978-5-4488-0520-2, 978-5-7996-2853-6

REFERENCES

1. Kovalev V.V., Seletskaya O.Yu., Pokamestov D.A. Formation and processing of OFDM signals. *Molodoi uchenyi = Young scientist*. 2016;14(118):151–154. Available from URL: <https://moluch.ru/archive/118/32800/>. Accessed December 17, 2023 (in Russ.).
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 Publ.; 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. Lufchich 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. 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.]
7. 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.]
8. 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>

9. 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>
10. Tripathi V., Patel P., Jain P.K., Shukla S. Peak-to-average power ratio reduction of orthogonal frequency division multiplexing signals using improved salp swarm optimization-based partial transmit sequence model. *ETRI Journal*. 2025;47(2):256–269. <https://doi.org/10.4218/etrij.2023-0347>
11. 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>
12. Oman B.O., Majeed Y.E., Ahmad I. Peak to average power ratio reduction in spectrally efficient FDM using repeated clipping and filtering. *Indonesian J. Electric. Eng. Computer Sci.* 2023;30(2):993–1001. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v30.i2.pp993-1001>
13. 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>
14. 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 VNIEM = Electromechanical Matters. VNIEM Studies*. 2023;193(2):34–38 (in Russ.).
15. 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 the 7th International Scientific and Practical Conference. Moscow: RTU MIREA; 2023. P. 140–142 (in Russ.).
16. Pham Th.T., Tikhonova O.V. Algorithm for selecting parameters of the limiting method with an additional signal in an orthogonal frequency division system. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM = Electromechanical Matters. VNIEM Studies*. 2024;199(2):52–55 (in Russ.).
17. Shorokhova I.S., Kislyak N.V., Mariev O.S. *Statisticheskie metody analiza (Statistical Methods of Analysis)*. Saratov, Yekaterinburg: Profobrazovanie, Ural Federal University; 2024. 298 p. ISBN 978-5-4488-0520-2, 978-5-7996-2853-6

Об авторах

Тихонова Ольга Вадимовна, д.т.н., старший научный сотрудник, профессор кафедры 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>

Стариковский Анатолий Иванович, к.т.н., доцент, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: starikovski@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926243, ResearcherID AAH-2239-2020, SPIN-код РИНЦ 1126-4471, <https://orcid.org/0000-0003-4040-3843>

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. SPIN-код РИНЦ 1885-7798, <https://orcid.org/0009-0000-7430-1779>

About the Authors

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>

Anatoly I. Starikovskiy, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, 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: starikovski@mirea.ru. Scopus Author ID 57208926243, ResearcherID AAH-2239-2020, RSCI SPIN-code 1126-4471, <https://orcid.org/0000-0003-4040-3843>

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. RSCI SPIN-code 1885-7798, <https://orcid.org/0009-0000-7430-1779>