

# АЛГОРИТМ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА ОГРАНИЧЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ СИГНАЛОМ В СИСТЕМЕ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

Фам Тхань Туан, О. В. Тихонова

**М**ультимплексирование с ортогональным частотным разделением каналов представляет собой схему передачи цифровой информации с несколькими несущими. Сигналы с ортогональным частотным разделением каналов имеют недостаток, связанный с высоким значением пик-фактора. Чтобы система с ортогональным частотным разделением каналов была эффективной, необходимо снизить пиковое значение. Одним из методов снижения пикового значения является метод ограничения с дополнительным сигналом. Существует два основных параметра значений уровня ограничения  $C$  и числа дополнительных сигналов  $m$ , которые в значительной мере влияют на эффективность метода, поэтому изучение и оценка этих параметров очень важны для применения метода в каждом конкретном случае. В этой статье мы рассмотрим приведение алгоритма выбора параметров метода ограничения с дополнительным сигналом.

**Ключевые слова:** метод ограничения с дополнительным сигналом, сигнал с ортогональным частотным разделением каналов, уменьшение значения пик-фактора, метод для уменьшения пик-фактора.

## Введение

Мультимплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM) – эффективный метод передачи данных для высокоскоростных систем связи. Сигналы OFDM широко используются в системах передачи цифровых сигналов телекоммуникационных систем. Сигналы OFDM имеют много преимуществ, однако есть и некоторые недостатки. Одним из основных недостатков системы OFDM является высокое отношение пиковой мощности к средней (peak-to-average power ratio, PAPR). Для эффективной передачи значение PAPR должно быть уменьшено. Для уменьшения PAPR в системе OFDM можно использовать метод ограничения с дополнительным сигналом.

### 1. Сигнал мультимплексирования с ортогональным частотным разделением каналов и метод ограничения с дополнительным сигналом

Сигнал OFDM с дискретным временем может быть математически представлен как [1, 2]:

$$S_{\text{OFDM}}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi kn/N}; \quad n=0, 1, 2, \dots; N-1, \quad (1)$$

где  $N$  – количество поднесущих сигналов;  $X(k)$  представляет передаваемую информацию на  $k$ -й поднесущей.

PAPR, как отношение максимальной мощности сигнала к средней мощности сигнала, для OFDM-сигналов с дискретным временем  $S(n)$  можно представить в виде [3]:

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

где  $\max_n |S_{\text{OFDM}}^2(n)|$  – максимальная мощность OFDM-сигнала;  $P_{\text{сред}} \{ |S_{\text{OFDM}}^2(n)| \}$  – средняя мощность OFDM-сигнала;  $|S_{\text{OFDM}}(n)|$  – амплитуда сигнала  $n$ -го отсчета сигнала OFDM.

Метод ограничения с дополнительным сигналом OFDM-сигнала является одним из методов для уменьшения PAPR-сигнала. В этом методе амплитуды сигнала OFDM ограничиваются определенным пороговым значением при сохранении начальной фазы  $n$ -го отсчета, что можно представить в виде [4 – 5]:

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

где  $C$  – это пороговое значение или уровень ограничения сигнала;  $|S_{\text{исход}}(n)|$  – амплитуда исходного сигнала  $n$ -го отсчета;  $\phi_n$  – фазовый угол  $n$ -го сигнала. Дополнительный сигнал  $S_{\text{допол}}(p)$  – разность между исходным и ограниченным сигналом, что описывается следующим выражением:

$$S_{\text{допол}}(p) = S_{\text{исход}}(p) - S_{\text{огран}}(p). \quad (4)$$

Для оценки эффективности метода следует учитывать достигнутое значение пик-фактора, скорость передачи сигнала, мощность на каждую поднесущую сигнала и вероятность битовой ошибки после использования метода.

Чтобы рассчитать скорость дискретного сигнала (скорость передачи символов) в системе OFDM, может быть использована следующая формула [6 – 7]:

$$R = 1/T, \quad (5)$$

где  $R$  – представляет собой скорость дискретного сигнала (скорость передачи символов), рассчитанную по количеству символов OFDM, передаваемых в единицу времени;  $T$  – период символа OFDM, время, которое символ OFDM занимает в канале.

Для расчета мощности на каждую поднесущую дискретного сигнала OFDM применяется следующая формула [8]:

$$P_{\text{поднес}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |S_{\text{OFDM}}(n)|^2, \quad (6)$$

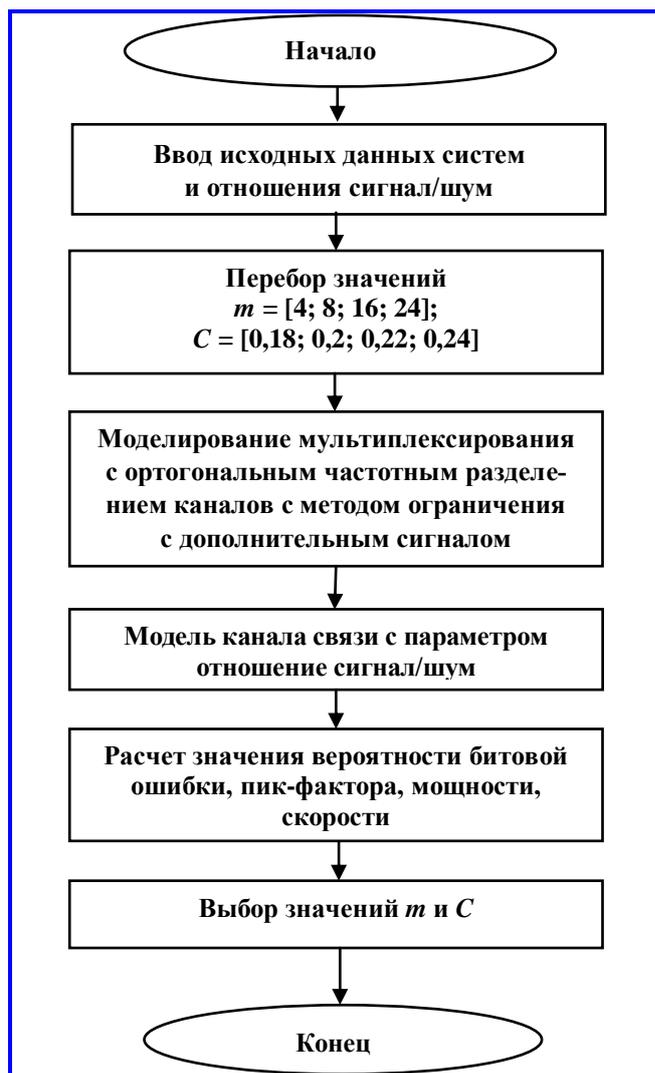
где  $P_{\text{поднес}}$  – средняя мощность на каждую поднесущую;  $N$  – количество поднесущих;  $|S_{\text{OFDM}}(n)|$  – амплитуда сигнала OFDM на поднесущей с номером  $n$ .

## 2. Алгоритм выбора параметров

На основе приведенных выше соотношений (2), (5) и (6) разработан алгоритм выбора параметров и проведен анализ его работы методом математического моделирования. Схема алгоритма выбора параметров метода ограничения с дополнительным сигналом представлена на рисунке.

Для каждого значения параметра значений уровня ограничения  $C$  и числа дополнительных сигналов  $m$  получены результаты скорости передачи сигнала, мощности каждой поднесущей сигнала, значения пик-фактора и вероятности битовой ошибки. Результаты представлены в таблице.

При отношении сигнал/шум, равном 15 дБ,  $P$  – средняя мощность на каждую поднесущую, а  $R_{\text{от}}$  – отношение скорости передачи после использования на скорости передачи исходного сигнала OFDM.



Алгоритм выбора параметров метода ограничения с дополнительным сигналом

Таблица

Вычисленные значения пик-фактора (PAPR), средней мощности ( $P$ ), отношения получаемой скорости к исходной в процентах ( $R_{\text{от}}$ ) и вероятности битовой ошибки (BER)

| Параметры            |     | PAPR<br>(пик-фактор) | $P$<br>(W) | $R_{\text{от}}$ , % | BER    |
|----------------------|-----|----------------------|------------|---------------------|--------|
| $C$ , % от исходного | $m$ |                      |            |                     |        |
| 45                   | 4   | 3,54                 | 0,0133     | 94,12               | 0,0150 |
| 45                   | 8   | 3,83                 | 0,0126     | 88,89               | 0,0128 |
| 45                   | 16  | 4,61                 | 0,0108     | 80                  | 0,0103 |
| 45                   | 24  | 5,28                 | 0,0092     | 72,73               | 0,0077 |
| 50                   | 4   | 4,4                  | 0,0138     | 94,12               | 0,0085 |
| 50                   | 8   | 4,79                 | 0,0127     | 88,89               | 0,0074 |
| 50                   | 16  | 5,54                 | 0,0107     | 80                  | 0,0052 |
| 50                   | 24  | 6,21                 | 0,0091     | 72,73               | 0,0040 |
| 55                   | 4   | 5,02                 | 0,0140     | 94,12               | 0,0067 |
| 55                   | 8   | 5,45                 | 0,0126     | 88,89               | 0,0052 |
| 55                   | 16  | 6,23                 | 0,0105     | 80                  | 0,0035 |
| 55                   | 24  | 6,9                  | 0,0090     | 72,73               | 0,0025 |
| 60                   | 4   | 5,05                 | 0,0140     | 94,12               | 0,0049 |
| 60                   | 8   | 5,51                 | 0,0126     | 88,89               | 0,0039 |
| 60                   | 16  | 6,3                  | 0,0105     | 80                  | 0,0024 |
| 60                   | 24  | 6,97                 | 0,0090     | 72,73               | 0,0017 |

### 3. Пример расчета параметров

Для определения параметров метода ограничения с дополнительным сигналом применим метод Парето [9]. Оптимизация по Парето применяется для решения задач многокритериальной оптимизации, когда необходимо найти компромиссное решение, удовлетворяющее нескольким конфликтующим целям или критериям одновременно.

Допустим, мы рассматриваем задачу оптимизации по выбору параметров  $C$  и  $m$  и имеем четыре критерия: значение пик-фактора, среднюю мощность, отношение скорости передачи к исходной и вероятность битовой ошибки. Мы хотим выбрать параметры  $C$  и  $m$ , которые имеют меньшее значение пик-фактора, меньшую среднюю мощность, большую скорость к исходной и меньшую вероятность битовой ошибки.

Тогда у нас есть следующие варианты выбора параметров:

1. Выбор А: значение пик-фактора менее 5,55, средняя мощность менее 0,011, скорость к исходной больше и равно 80% и минимальная вероятность битовой ошибки.

2. Выбор В: значение пик-фактора менее 5,55, средняя мощность больше 0,013, скорость к исходной больше 90% и вероятность битовой ошибки менее 0,005.

3. Выбор С: значение пик-фактора менее 5,55, средняя мощность менее 0,011, скорость к исходной больше 88%, и минимальная вероятность битовой ошибки.

4. Выбор D: значение пик-фактора менее 4,5, средняя мощность больше 0,01, скорость к исходной больше 90% и минимальная вероятность битовой ошибки.

Из данных таблицы и условий выбора параметров для варианта А выбираем значение уровня ограничения  $C = 50\%$  и число дополнительных сигналов  $m = 16$ . Для варианта В выбираем значение уровня ограничения  $C = 60\%$  и число дополнительных сигналов  $m = 4$ . Для варианта С выбираем значение уровня ограничения  $C = 55\%$  и число дополнительных сигналов  $m = 8$ . Для варианта D выбираем значение уровня ограничения  $C = 50\%$  и число дополнительных сигналов  $m = 4$ .

Выбор параметров  $C$  и  $m$  метода для эффективной работы системы зависит от каждого конкретного случая.

### Заключение

Алгоритм выбора параметров метода ограничения с дополнительным сигналом хоть и не яв-

ляется оптимальным, позволяет определить те значения уровня ограничения  $C$ , числа дополнительных сигналов, пик-фактора (PAPR), средней мощности ( $P$ ), отношения получаемой скорости к исходной в процентах ( $R_{от}$ ) и вероятности битовой ошибки (BER), которые удовлетворяют поставленным для каждой системы условиям. Корректность работы алгоритма проверена методом математического моделирования.

### Литературы

1. Ковалев, В. В. Формирование и обработка OFDM сигналов / В. В. Ковалев, О. Ю. Селецкая, Д. А. Покаместов // Молодой ученый. – 2016. – № 14 (118). – С. 151–154. – URL: <https://moluch.ru/archive/118/32800/>.
2. Методы повышения энергетической эффективности OFDM модемов в каналах связи с частотно-селективными замираниями / П. В. Луферчик, А. Н. Конев, Е. В. Богатырев [и др.] // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2022. – Т. 23. – № 2. – С. 189–196.
3. Hassan, G. M. Modified Method of PAPR Reduction using Clipping and Filtering for Image Transmission with OFDM / G. M. Hassan, M. Mukred, A. H. Gumaei // Al-Mustansiriyah Journal of Science. – 2023. – Vol. 34. – No. 4. – P. 75–86.
4. Фам Тхань Туан. Метод ограничения с дополнительным сигналом для уменьшения пик-фактора в системе с ортогональным частотным разделением каналов / Фам Тхань Туан, О. В. Тихонова // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2023. – Т. 193. – № 2. – С. 34–38.
5. Фам, Т. Т. Метод ограничения пик-фактора сигнала OFDM с дополнительным сигналом / Т. Т. Фам, О. В. Тихонова // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «РАДИОИНФОКОМ – 2023»: Сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции, Москва, 23 ноября 2023 года. – Москва : МИРЭА – Российский технологический университет, 2023. – С. 140–142.
6. Hassan, Ahmed K. Peak to Average Power Ratio Reduction of OFDM Signals Using Clipping and Iterative Processing Methods / Ahmed K. Hassan // Al-Khwarizmi Engineering Journal. – 2008. – Vol. 4. – No. 4. – P. 82–90.
7. Proakis, John G. Digital Communications / John G. Proakis, Masoud Salehi. – 5th ed. – New York : McGraw-Hill, 2008. – P. 1170.
8. Гришин, И. В. Обзор методов многочастотной модуляции сигналов в современных сетях беспроводной связи / И. В. Гришин, А. А. Калинин // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2020. – Т. 8. – № 2. – С. 55–66.
9. Була, А. К. Оптимизация формы множества Парето в задачах многокритериального программирования / А. К. Була, Е. А. Умнов, А. Е. Умнов // ТРУДЫ МФТИ. – 2017. – Т. 9. – № 4. – С. 120–131.

Поступила в редакцию 02.04.2024

Фам Тхань Туан, аспирант, т. +7 (977) 139-68-66, e-mail: [anhsequayve.ru@gmail.com](mailto:anhsequayve.ru@gmail.com).

*Ольга Вадимовна Тихонова, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов, т. +7 (916) 523-35-68, e-mail: o\_tikhonova@inbox.ru. (ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»).*

## ALGORITHM FOR SELECTING PARAMETERS OF THE LIMITING METHOD WITH AN ADDITIONAL SIGNAL IN AN ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION SYSTEM

**Pham Thanh Tuan, O. V. Tikhonova**

*Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is a multi-carrier digital information transmission scheme. OFDM signals have the disadvantage of a high crest factor. For an OFDM system to be effective, the peak value must be reduced. One method for reducing the peak value is the clipping method with an additional signal. There are two main parameters of the value of the restriction level  $C$  and the number of additional signals  $m$ , which greatly influence the effectiveness of the method, so the study and evaluation of these parameters are very important for applying the method in each specific case. In this article we will look at reducing the parameter selection algorithm for the constraint method with an additional signal.*

**Keywords:** additional signal clipping method (MODS), OFDM signal, Crest factor reduction, method for crest factor reduction.

### References

1. Kovalev, V. V. Formation and processing of OFDM signals / V. V. Kovalev, O. Yu. Seletskaya, D. A. Pokamestov // Young scientist. – 2016. – No. 14 (118). – P. 151–154. – URL: <https://moluch.ru/archive/118/32800/>.
2. Methods for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading communication channels / P. V. Luforchik, A. N. Konev, E. V. Bogatyrev [et. al.] // Siberian Aerospace Journal. – 2022. – Vol. 23. – No. 2. – P. 189–196.
3. Hassan, G. M. Modified Method of PAPR Reduction using Clipping and Filtering for Image Transmission with OFDM / G. M. Hassan, M. Mukred, A. H. Gumaiei // Al-Mustansiriyah Journal of Science. – 2023. – Vol. 34. –No.4. –P. 75–86.
4. Pham Thanh Tuan. Limitation method with an additional signal to reduce the crest factor in a system with orthogonal frequency division of channels / Pham Thanh Tuan, O. V. Tikhonova // Issues of Electromechanics. Proceedings of VNIIEМ. – 2023. – Vol. 193. – No. 2. – P. 34–38.
5. Pham, T. T. Method for limiting the peak factor of an OFDM signal with an additional signal / T. T. Pham, O. V. Tikhonova // Current problems and prospects for the development of radio engineering and infocommunication systems «RADIOINFCOM – 2023»: Collection of scientific articles of the VII International Scientific and Practical Conference, Moscow, November 23, 2023. – Moscow : MIREA – Russian Technological University, 2023. – P. 140–142.
6. Hassan, Ahmed K. Peak to Average Power Ratio Reduction of OFDM Signals Using Clipping and Iterative Processing Methods / Ahmed K. Hassan // Al-Khwarizmi Engineering Journal. – 2008. – Vol. 4. – No. 4. – P. 82–90.
7. Proakis, John G. Digital Communications / John G. Proakis, Masoud Salehi. – 5th ed. – New-York : McGraw-Hill, 2008. – P. 1170.
8. Grishin, I. V. Review of methods of multi-frequency modulation of signals in modern wireless communication networks / I. V. Grishin, A. A. Kalinkina // Information technologies and telecommunications. – 2020. – Vol. 8. – No. 2. – P. 55–66.
9. Bula, A. K. Optimization of the form of the Pareto set in multicriteria programming problems / A. K. Bula, E. A. Umnov, A. E. Umnov // PROCEEDINGS OF MIPT. – 2017. – Vol. 9. – No. 4. – P. 120–131.

*Pham Thanh Tuan, Postgraduate student, t.+7 (977) 139-68-66, e-mail: anhsequayve.ru@gmail.com.  
Olga Vadimovna Tikhonova, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Department of Radio-Electronic Systems and Complexes, t.+7 (916) 523-35-68, e-mail: o\_tikhonova@inbox.ru. (MIREA – Russian Technological University).*