

# МЕТОД ОГРАНИЧЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ СИГНАЛОМ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ ПИК-ФАКТОРА 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. Метод ортогонального частотного разделения каналов используется в беспроводной связи четвертого поколения. Основное преимущество ортогонального частотного разделения каналов заключается в том, что исключаются перекрестные помехи между подканалами и не требуются полосы частот между несущими. Однако ортогональное частотное разделение каналов имеет некоторые недостатки. Одна из сложных проблем системы – высокое значение пик-фактора. В этой статье мы рассмотрим и проанализируем метод уменьшения пик-фактора – метод ограничения с дополнительным сигналом.

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

## Введение

Мультимплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) для обеспечения высокоскоростных мультимедийных услуг представляет собой схему модуляции с эффективным использованием полосы пропускания и имеет несколько преимуществ, таких как устойчивость к помехам, малая сложность реализации и высокая спектральная эффективность. Однако многие поднесущие, необходимые для мультимедийных услуг, показывают высокое отношение пиковой мощности к средней мощности, что приводит к серьезному снижению производительности при использовании нелинейного усилителя высокой мощности (НРА). Нелинейность НРА приводит к внутрисполосным искажениям, что увеличивает частоту битовых ошибок (BER) системы и внеполосное излучение, вызывающее сильные помехи в соседнем канале.

## 1. Сигнал OFDM

Ортогональные сигналы на поднесущих в OFDM-сигналах [1 – 3] выбираются из условия:

$$\int \sin(2\pi f_l t) \sin(2\pi f_k t) dt = 0, k \neq l, \quad (1)$$

где  $f_k$  – несущие частоты каналов  $k$ ;  $f_l$  – несущие частоты каналов  $l$ .

Сигнал OFDM может быть математически представлен как:

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

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

## 2. Сигнал OFDM с проблемой пик-фактора

Пик-фактор (отношение пиковой мощности к средней, PAPR) сигнала определяется как отно-

шение его максимальной мгновенной мощности к его средней мощности. Амплитуда сигнала OFDM представляет собой случайное наложение всех амплитуд поднесущих, что может вызвать большие пиковые значения уровня сигнала по сравнению со средним и тем самым увеличение нелинейных влияний. Преодоление высокого PAPR или его снижение является одним из решений для повышения производительности системы OFDM.

PAPR определяется как отношение максимальной мощности сигнала к средней мощности сигнала [4] для сигнала OFDM с дискретным временем  $x(n)$ :

$$PAPR(S_{ofdm}[n]) = \frac{\max_n |s_{ofdm}(n)|^2}{P_{cp} \{ |s_{ofdm}(n)|^2 \}}, \quad (3)$$

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

## 3. Способ ограничения сигнала

Одним из простейших методов исправления сигнала является метод ограничения высоких пиков сигнала OFDM [5]. В этом методе амплитуды OFDM-сигнала ограничиваются при превышении определенного порогового значения, при этом сохраняя исходную фазу отсчетов, что описывается следующим выражением:

$$s_{огр}(n) = \begin{cases} s_{исход}(n), & |s_{исход}(n)| \leq C \\ C \cdot e^{j\theta_n}, & |s_{исход}(n)| > C \end{cases}, \quad (4)$$

где  $C$  – пороговое значение;  $S_{исход}(n) = |S_{исход}(n)| \cdot e^{j\theta_n}$ ;  $\theta_n$  – фазовый угол  $n$ -го сигнала OFDM.

Ограничение – нелинейный процесс, что приводит как к внутрисполосным, так и к внеполосным искажениям, поэтому вероятность битовой ошибки при демодуляции будет большой. Для решения этой проблемы предлагается метод ограничения с дополнительным сигналом (МОДС). Этот метод очень эффективен для снижения PAPR, и с помощью этого метода процесс восстановления сигнала происходит с хорошими результатами.

#### 4. Метод ограничения с дополнительным сигналом

После прохождения сигнала через преобразование Фурье произведем поиск позиции  $m$ , где сигнал больше, чем пороговое значение  $C$ . Этот сигнал

ограничивается в соответствии с выражением (4), а в дополнительных символах указывается номер позиции  $m$  и дополнительный сигнал  $S_{\text{доп}}(m)$ , который определяется как разность исходного и ограниченного сигналов:

$$S_{\text{доп}}(m) = S_{\text{исход}}(m) - S_{\text{огр}}(m), \quad (5)$$

где  $S_{\text{доп}}(m)$  – дополнительный сигнал.

Таким образом, наряду с ограниченным сигналом на позиции  $m$  передается величина, на которую сигнал был уменьшен.

Структурная схема OFDM-передатчика и приемника показана на рис. 1 и рис. 2.

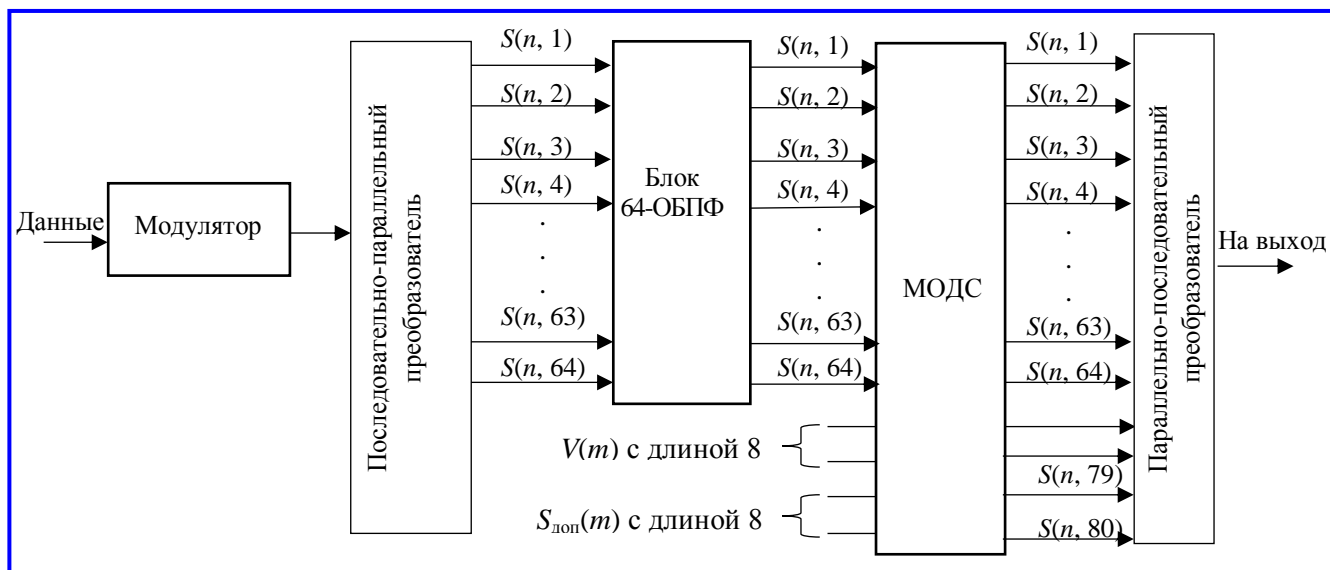


Рис. 1. Структурная схема OFDM-передатчика при ограничении сигнала ( $V(m)$  – сигнал позиции; ОБПФ – обратное быстрое преобразование Фурье)

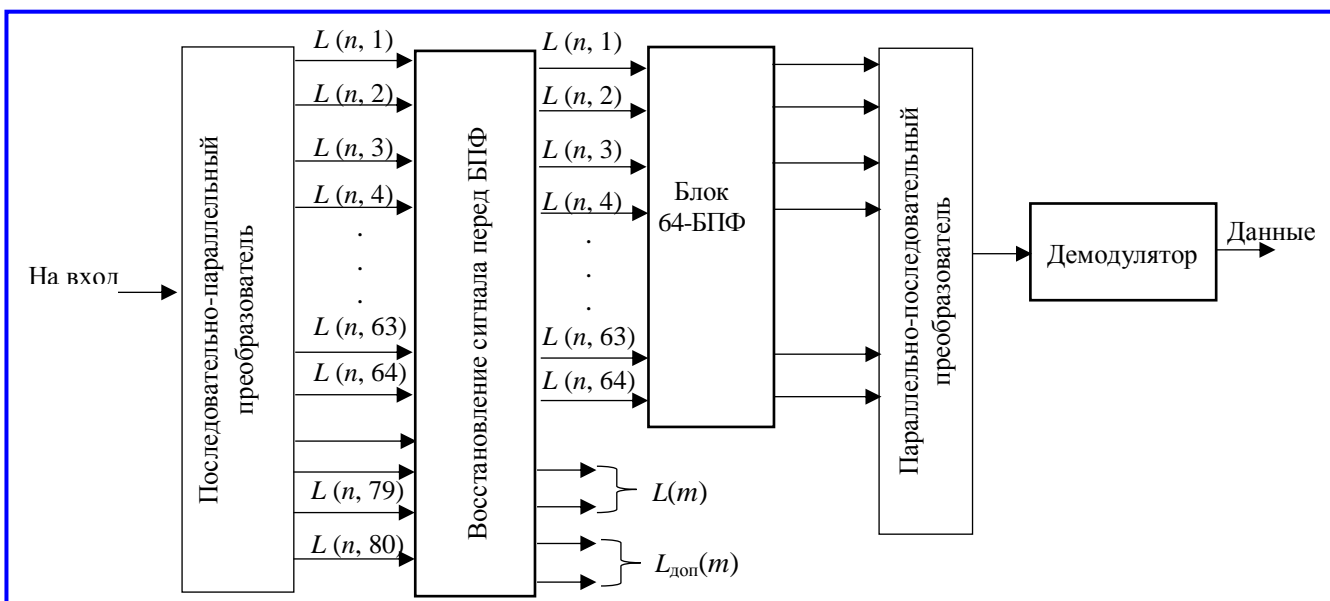


Рис. 2. Структурная схема OFDM-приемника при ограничении сигнала ( $L(m)$  – демодуляция сигнала позиции;  $L_{\text{доп}}(m)$  – дополнительный сигнал; БПФ – быстрое преобразование Фурье)

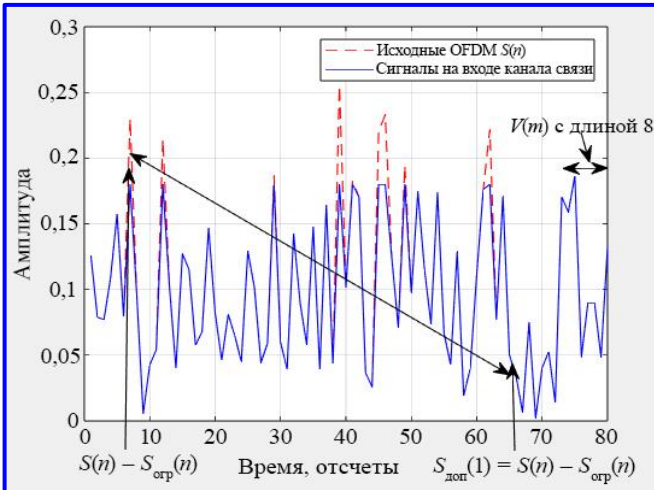


Рис. 3. Пример OFDM-сигнала на входе канала связи после ограничения с дополнительным сигналом с длиной 16

Ограничим число дополнительных сигналов, которые определяют номера ограниченных (пиковых) позиций  $m$  и дополнительные сигналы  $S_{доп}(m)$ , величиной 8. Если число ограниченных сигналов больше 8, рассматриваются только первые 8 значений, а если  $m$  меньше 8, то дополняем информацию нулевыми значениями, чтобы общая длина сигнала была 8. Заметим, что способ выбора величины ограничения будет исследован в дальнейшем.

Пример OFDM-сигнала для  $N = 64$  поднесущих приведен на рис. 3.

Блок-схема алгоритма модуляции и демодуляции OFDM-сигнала с дополнительным сигналом показан на рис. 4.

Вероятность того, что PAPR превысит определенный порог, определяется дополнительной кумулятивной функцией распределения (CCDF), которая является мерой ограничения PAPR. Чтобы определить границы минимального количества битов избыточности, необходимых для идентификации последовательностей PAPR, и оценить производительность любых схем уменьшения PAPR, можно применить CCDF для PAPR.

Дополнительную кумулятивную функцию распределения (CCDF) сигналов OFDM представим в виде:

$$CCDF = Pr(PAPR_n > PAPR_0), \quad (6)$$

это вероятность того, что на шаге  $n$  значение амплитуды  $PAPR_n$  превысит порог  $PAPR_0$ .

Результаты снижения PAPR при использовании метода ограничения иллюстрируются на рис. 5. На рис. 5 показаны кривые CCDF сигналов OFDM до и после применения метода ограничения с дополнительным сигналом. Можно заметить, что значение PAPR, полученное методом ограничения с дополнительным сигналом при  $CCDF = 10^{-4}$ , снижается примерно до 6 дБ по сравнению с PAPR, полученным в исходной системе OFDM.

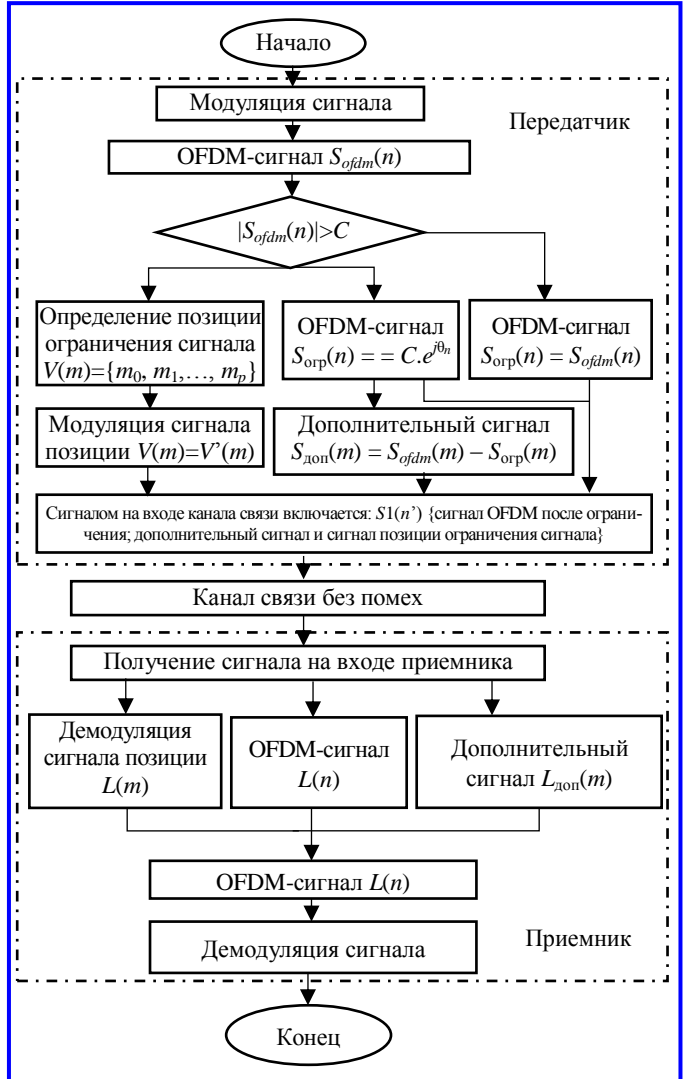


Рис. 4. Блок-схема алгоритма модуляции и демодуляции OFDM-сигнала с дополнительным сигналом

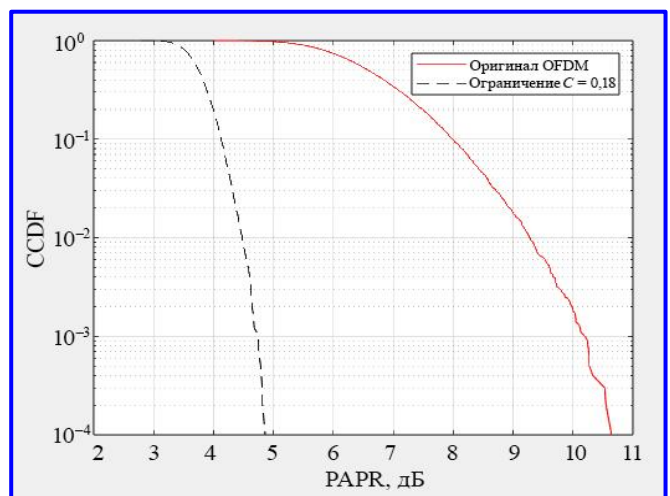
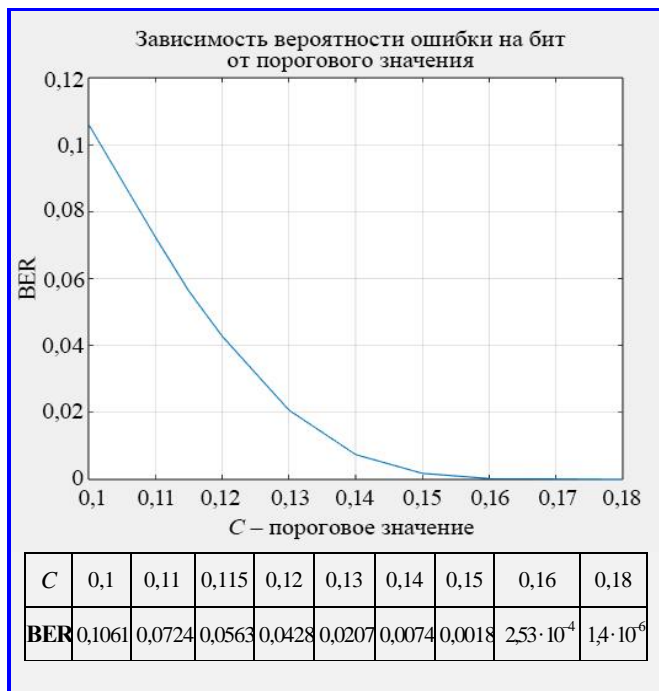


Рис. 5. Результат снижения PAPR OFDM-сигнала алгоритмом ограничения с дополнительным сигналом



**Рис. 6.** Зависимость вероятности ошибки на бит (BER) от порогового значения в отсутствии помехи при  $n = 2,56 \cdot 10^7$  сигналов OFDM (QAM-16 и 64-БПФ)

Из приведенного выше рис. 6 видно, что при ограничении сигнала до определенного уровня  $C$  в выражении (4) чем больше пороговое значение  $C$ , тем меньше значение BER, то есть точность передачи выше.

#### Заключение

В результате проведенного исследования метода

уменьшения значения пик-фактора в системе OFDM сделаны следующие выводы:

1. После применения метода ограничения с дополнительным сигналом значение PAPR уменьшилось на 6 дБ.

2. Простота метода ограничения с дополнительным сигналом обеспечивает эффективность снижения PAPR при неизменном значении битовой ошибки. Предлагаемый метод ограничения с дополнительным сигналом более эффективен, чем способ ограничения сигнала.

#### Литература

1. Галустов Г. Г. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов : учебное пособие / Г. Г. Галустов, С. Н. Мелешкин. – Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 80 с.
2. Richard V. N. OFDM for Wireless Multimedia Communications / V. N. Richard, Pr. Ramjee. – Boston ; London : Artech House, 1999. – P. 260 [1].
3. Wu Y. Orthogonal frequency division multiplexing: a multi-carrier modulation scheme / Y. Wu, W. Y. Zou // IEEE Trans. Consumer Electron. – 1995. – Vol. 41. – № 3. – P. 392–399.
4. Пукса А. О. Уменьшение пик-фактора OFDM-сигнала с помощью методов, основанных на ограничении сигналов / А. О. Пукса // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – Ч. 5. – № 12 (66). – С. 124–127.
5. Shatrughna P. Y. PAPR Reduction using Clipping and Filtering Technique for Nonlinear Communication Systems / P. Y. Shatrughna, C. B. Subhash // International Conference on Computing, Communication and Automation, 2015. – P. 1220–1225.

Поступила в редакцию 17.04.2023

*Фам Тхань Туан, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов  
Института радиоэлектроники и информатики, e-mail: anhsequayve.ru@gmail.com.  
Ольга Вадимовна Тихонова, доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов, e-mail: o\_tikhonova@inbox.ru.  
(МИРЭА – Российский технологический университет).*

## LIMITATION METHOD WITH AN ADDITIONAL SIGNAL TO PAPR REDUCTION IN THE SYSTEM WITH ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION OF CHANNELS

Pham Thanh Tuan, O. V. Tikhonova

*Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is a multi-carrier transmission scheme. The OFDM method is used in the fourth generation wireless communication. The main advantage of OFDM is that it eliminates crosstalk between subchannels and does not require bandwidth between carriers. However, OFDM has some disadvantages. One of the complex problems of the system is the high value of the crest factor. In this article, we will review and analyze a crest factor reduction method, the supplemental signal clipping method (MODS).*

**Keywords:** PAPR reduction, bit error rate, OFDM signal, limitation method with an additional signal (MODS).

#### References

1. Galustov G. G. Multiplexing with orthogonal frequency division of signals : Textbook / G. G. Galustov, S. N. Meleshkin. – Taganrog : TTI SFU Publishing House, 2012. – 80 p.

2. Richard V. N. OFDM for Wireless Multimedia Communications / V. N. Richard, Pr. Ramjee. – Boston ; London : Artech House, 1999. – P. 284.
3. Wu Y. Orthogonal frequency division multiplexing: a multi-carrier modulation scheme / Y. Wu, W. Y. Zou // IEEE Trans. Consumer Electron. – 1995. – Vol. 41. – № 3. – P. 392–399.
4. Puksa A. O. Reducing the crest factor of an OFDM signal using methods based on signal clipping / A. O. Puksa // International Scientific Research Journal. – 2017. – Part 5. – No. 12 (66). – P. 124–127.
5. Shatrughna P. Y. PAPR Reduction using Clipping and Filtering Technique for Nonlinear Communication Systems / P. Y. Shatrughna, Ch. B. Subhash // International Conference on Computing, Communication and Automation. – 2015. – P. 1220–1225.

*Pham Thanh Tuan, Postgraduate student of the Department of Radioelectronic Systems and Complexes Institute of Radio Electronics and Computer Science, 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, e-mail: o\_tikhonova@inbox.ru. (MIREA – Russian Technological University).*