

## Метод повышения энергетической эффективности систем OFDM, основанный на уменьшении пик-фактора

А.Х. Султанов, И.К. Мешков, А.А. Ишмияров

Уфимский государственный авиационный технический университет  
450008, Российская Федерация, г. Уфа  
ул. К. Маркса, 12

В статье предложен метод снижения пик-фактора для систем, работающих по технологии OFDM, основанный на обработке поднесущих частот группового спектра и повороте сигнального созвездия. Оценены такие параметры OFDM-системы как мгновенное значение пик-фактора, битовая вероятность ошибки при приеме сигнала, выборочная (эмпирическая) функция распределения значений пик-фактора в зависимости от используемых функций предкодирования. Проведено экспериментальное исследование, подтверждающее эффективность предложенного метода. Теоретическая значимость работы заключается в использовании дискретных функций для предкодирования и одновременном преобразовании сигнала на каждой поднесущей. Практическая новизна работы состоит в возможности использования разработанного метода уменьшения пик-фактора в системах цифрового телевидения стандарта DVB-T2. Применение данного метода позволит более полно использовать рабочий диапазон усилителей мощности и избежать нелинейных искажений при передаче сигнала по каналу связи. Применение поворота сигнального созвездия на рекомендованный угол при заданном виде модуляции приведет к уменьшению битовой вероятности ошибки принимаемого сигнала.

*Ключевые слова:* ортогональное частотное мультиплексирование, пик-фактор, предварительное кодирование, нелинейные искажения, поворот сигнального созвездия, дискретные функции, функция распределения, битовая вероятность ошибки, энергетическая эффективность, помехоустойчивость.

Сигналы с ортогональным частотным мультиплексированием (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) широко применяются в современных сетях широкополосного беспроводного доступа. Возросший поток данных требует увеличения скорости передачи в канале и повышения спектральной эффективности сигналов. Технология OFDM была включена в проводных приложениях, таких как передача данных по линиям электропередачи (PLC), цифровые абонентские линии (DSL); в беспроводных широкополосных приложениях, такие как цифровое аудио вещание (DAB) и цифровое телевизионное вещание (DVB). Кроме того, она широко реализована в беспроводных локальных сетях (WLAN); в стандартах IEEE 802.11a/g/n/ac, IEEE 802.16d/e, ETSI HIPERLAN/2; в беспроводных системах стандартов LTE и LTE-A и сверхширокополосных (UWB) системах передачи данных. В настоящее время она рассматривается в качестве кандидата для поддержки будущих систем связи пятого поколения (5G) [1–3].

Технология OFDM предполагает эффективное использование спектра за счет передачи данных параллельно по множеству близко расположенных друг к другу узкополосных частотных

подканалов [4; 5]. Следствием многоканальности системы являются ее преимущества: способность противостоять многолучевому распространению, устойчивость к узкополосным помехам и частотно-селективным замираниям, увеличение битовой скорости передачи данных с помощью использования различных схем модуляции.

Несмотря на преимущества, которые дает передача сигнала на множестве поднесущих, существуют также недостатки, связанные в первую очередь с неравномерным распределением мощности на поднесущих за счет использования нулевых поднесущих, пилот-сигналов и информационных несущих. В связи с этим различаются средняя мощность полосы пропускания сигнала и пиковая мощность на выборке, состоящей из всех поднесущих, следствием чего становится высокое значение пик-фактора сигнала в системах, использующих OFDM. Пик-фактором (PAPR – Peak-to-Average Power Ratio) сигнала называется отношение его пиковой мощности к средней в полосе пропускания сигнала  $s(t)$  [6–9]:

$$PAPR[s(t)] = \frac{\max(|s(t)|^2)}{E(|s(t)|^2)}.$$

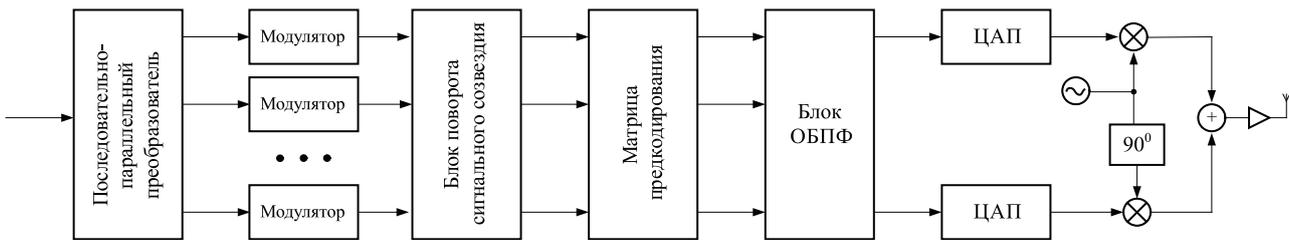


Рис. 1

Нелинейные искажения, вызванные высоким пик-фактором, приводят к нарушению ортогональности поднесущих, что приводит к увеличению вероятности появления битовой ошибки принимаемого сигнала. Высокий пик-фактор требует производства выходного усилителя мощности с достаточной большим динамическим диапазоном усиления, что приводит к снижению КПД передатчика. Также за счет выбросов на пиках поднесущих повышается выходная мощность усилителя, что ведет к снижению энергоэффективности системы, которая определяется коэффициентом использования мощности сигнала при заданной спектральной плотности мощности помехи [4; 5]. Из-за проблемы с высокой пиковой мощностью OFDM, при использовании нелинейных усилителей нарушается спектральная сетка OFDM сигнала, что приводит к увеличению коэффициента битовой ошибки при приеме полезного сигнала. Также высокий пик-фактор приводит к ухудшению эффективности усиления сигнала в передатчике. Данный недостаток значительно ограничивает область применения сигналов с OFDM и накладывает ограничения на скорость передачи данных и достоверность приема. Таким образом, разработка методов и способов уменьшения значения пик-фактора является актуальной научно-технической задачей для современных и перспективных систем беспроводной связи, использующих OFDM.

В современных сетях беспроводной связи существует несколько методов уменьшения пик-фактора, такие как использование формирующих фильтров [9; 11; 12], ограничение сигнала по уровню [10; 13], селективное распределение [14], добавление поднесущих [15], предварительное кодирование [16–18].

В ходе анализа современных исследований в данной области выяснено, что метод предварительного кодирования имеет преимущество в виде меньшего уровня внеполосного излучения за счет нелинейного преобразования сигнала по сравнению с остальными методами. Это простой

линейный метод с приемлемой сложностью реализации, поскольку используется predetermined матрица предварительного кодирования и, таким образом, не требуется подтверждения связи между передатчиком и приемником. Наличие одной и той же матрицы предварительного кодирования для всех блоков OFDM позволяет избежать всей обработки, необходимой для методов блочной оптимизации. Метод работает с произвольным числом поднесущих и любым типом используемой модуляции полосы частот [16]. Основной сложностью данного метода является выбор функций предкодирования, так как необходимо найти оптимальную функцию предкодирования в зависимости от типа входного сигнала с точки зрения минимизации пик-фактора этого сигнала.

Для систем цифрового телевидения, работающих по стандарту DVB-T2 характерно использование вращения сигнального созвездия, как способа, позволяющего повысить помехоустойчивость системы [19]. Также его можно рассматривать и как способ повышения энергоэффективности. В сетях стандарта DVB-T2 не требуется изменения схемотехнических решений и способов формирования сигнала для реализации данного метода. Значения углов поворота созвездия определены в стандарте DVB-T2 в зависимости от используемого типа модуляции [19].

Таким образом, представляется необходимым разработку математической модели OFDM-передатчика на основе совместного применения предкодирования и поворота сигнального созвездия. Упрощенная структура OFDM-передатчика представлена на рис. 1.

В передающей части OFDM-системы входной поток данных разделяется на  $N$  параллельных низкоскоростных потоков данных по числу поднесущих. Модулированный символ  $k$ -й поднесущей представлен в виде  $X_k$ , с интервалом символа  $T_s$ . Принципиальное отличие данной схемы состоит во введении так называемой матрицы предкодирования для уменьшения пик-фактора.

Используется матрица  $P$  размером  $N \times N$  перед блоком ОБПФ. Матрица предварительного кодирования  $P$  может быть записана как:

$$P = \begin{pmatrix} P_{00} & \cdots & P_{0(N-1)} \\ P_{10} & \cdots & P_{1(N-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{(N-1)0} & \cdots & P_{(N-1)(N-1)} \end{pmatrix}.$$

Комплексный OFDM-сигнал в основной полосе частот с  $N$  поднесущими может быть записан как:

$$x_m(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{K=0}^{N-1} P X_k e^{j2\pi k \Delta f t}, \quad 0 \leq t \leq N T_s,$$

где  $\Delta f$  – частотный сдвиг, обусловленный неточностью генератора несущей частоты.

Считается, что в системе OFDM с применением QPSK-модуляции  $E\{|X_k|^2\} = 1$  и символы не коррелируют между собой в каждом блоке. Тогда, максимальный PAPR сигнала OFDM с предкодированием задается следующим образом:

$$PAPR = \frac{1}{N} \max_{0 \leq t \leq T} \left( \sum_{k=0}^{N-1} |P_k(e^{j\omega}) e^{j2\pi k t/T}| \right)^2.$$

Для того чтобы сохранить ортогональность поднесущих и избежать межсимвольной интерференции, необходимо, чтобы функция предварительного кодирования  $P_k$  удовлетворяла следующему условию:

$$\begin{cases} p_k(t) = 0, & \left| t - \frac{T}{2} \right| > \frac{T}{2}, \\ P_k\left(f - \frac{k}{T}\right) \approx 0, & \left| t - \frac{1}{2T_s} \right| > \frac{1}{2T_s} + \frac{\beta}{2T_s}. \end{cases}$$

Минимальная пропускная способность функции предкодирования должна быть сравнима с полосой пропускания сигнала OFDM, который равен  $1/T_s$ . Так же  $\beta$  является расчетным показателем, который представляет из себя коэффициент сглаживания.

Для уменьшения PAPR в передаваемом OFDM сигнале, функция предкодирования должна быть разработана таким образом, чтобы пики не появлялись в одно и то же время. Один из способов заключается в выборе различных функций для каждой поднесущей. Этот способ может быть относительно сложным. Более простой подход заключается в разработке одной основной части функции, остальная часть будет порождаться циклическими сдвигами излучения в интервале времени  $0 \leq t < T$ . Частотная характеристика

основной функции обозначается  $P_0(e^{j\omega})$ , а затем преобразовывается по закону:

$$P_k(e^{j\omega}) = P_0(e^{j\omega}) e^{-j\omega k}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1,$$

где  $P_0(e^{j\omega})$  – частотная характеристика идеальных импульсов (например, прямоугольного импульса, импульса приподнятого косинуса или импульс квадратного корня из приподнятого косинуса). В практической реализации, вместо того, чтобы выбирать идеальные фильтры для построения функции предкодирования следует произвести усечение с последующей дискретизацией:

$$P_{i,k} = P_{i,0} e^{-j2\pi \frac{i k}{N}},$$

где  $i = 0, 1, \dots, L-1$ ;  $L = (1 + \beta)N$ ;  $k = 0, 1, \dots, N-1$ .

Требованиям удовлетворяют функции вида:

$$P(e^{j\omega}) = A(\omega) e^{-j r \omega},$$

где амплитудная характеристика задается как

$$A(\omega) = \sum_{k=0}^r h_k \cos(\omega) = h^T e(\omega).$$

Из семейства дискретных функций данного вида выбраны 5 различных функций для оценки эффективности снижения значения пик-фактора: DHT (Discrete Hartley transform) – дискретное преобразование Хартли, DCT (Discrete Cosine transform) – дискретное косинусное преобразование, DST (Discrete Sine transform) – дискретное синусное преобразование, FWHT (Fast Walsh–Hadamard transform) – быстрое преобразование Уолша – Адамара, DFT (Discrete Fourier Transform) – дискретное преобразование Фурье.

На основе использования полученных функций предкодирования в среде программирования MatLab была разработана имитационная модель, с помощью которой оцениваются такие параметры OFDM-системы как мгновенное значение пик-фактора, битовая вероятность ошибки при приеме сигнала, выборочная (эмпирическая) функция распределения CCDF, показывающая вероятность того, что величина PAPR примет значение большее произвольного числа  $PAPR_0$ . В качестве входных параметров в модели заданы: количество поднесущих, вид и кратность модуляции, тип функции предкодирования, длина защитного интервала и др.

На рис. 2 представлены результаты работы имитационной модели: сигнальные созвездия

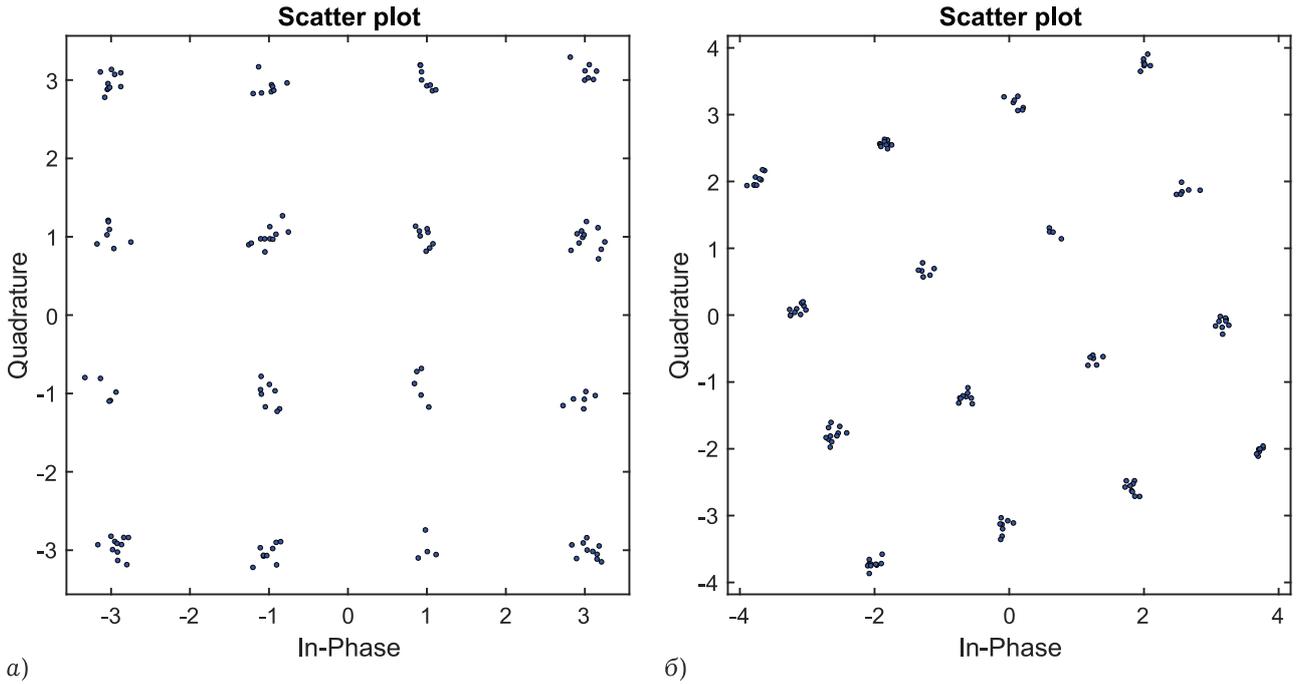


Рис. 2

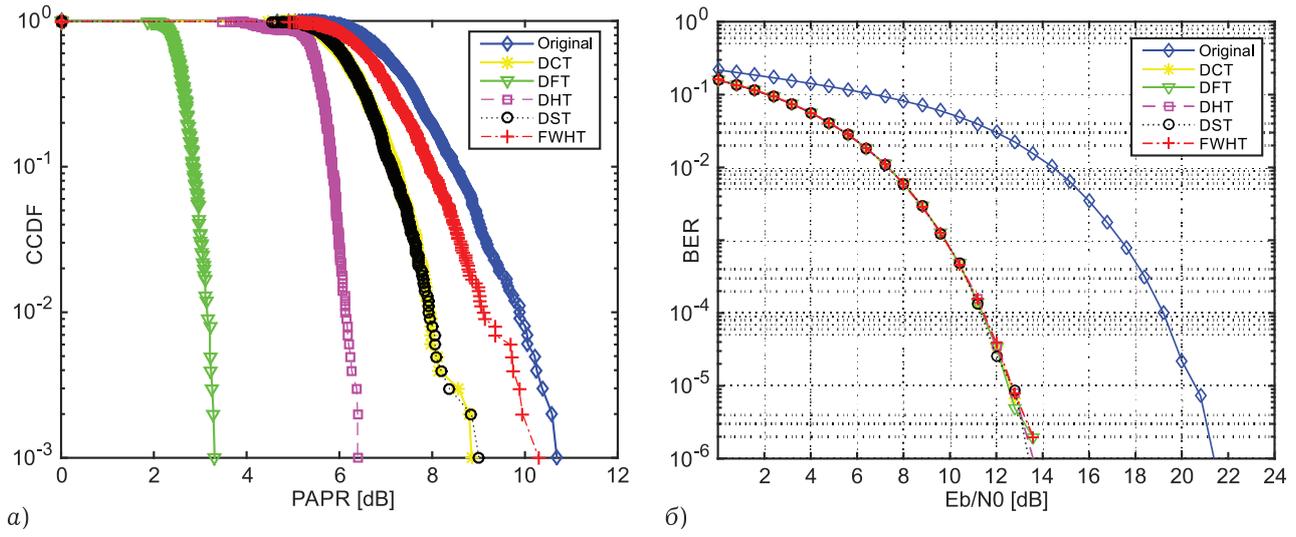


Рис. 3

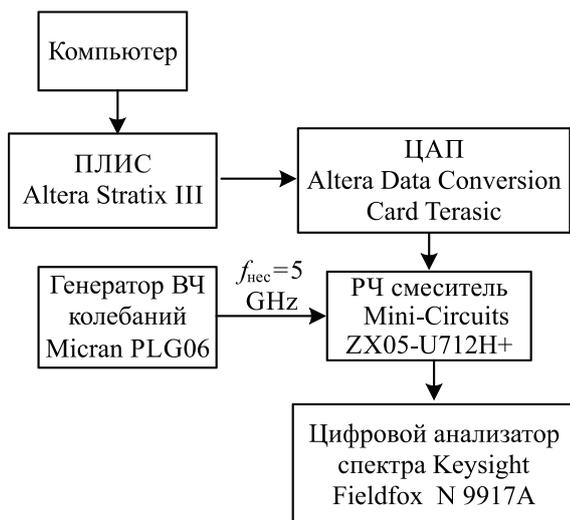
принятого 16-QAM сигнала – а) без обработки и б) с поворотом сигнального созвездия и предкодированием с помощью функции DFT.

Из рисунка можно видеть, что плотность точек повернутого сигнального созвездия более высокая, что при низких отношениях сигнал-шум может стать решающим для правильного приема сигналов. Далее имитационная модель количественно оценивает пик-фактор и помехоустойчивость системы с применением поворота сигнального созвездия и предкодирования.

На рис. 3 представлены результаты работы модели для различных типов функций предкодирования с типом используемой модуляции 16-QAM и углом поворота 16,8 градуса на 128 подне-

сущих. Длина защитного интервала  $T_3 = 0,25T_S$ . Как видно из рисунка, имитационная модель показывает снижение пик-фактора до 7 дБ в зависимости от типа использованной функции предкодирования. Также показано, что при повышении кратности модуляции, а также увеличении числа поднесущих, пик-фактор системы в целом возрастает. Показано также улучшение помехоустойчивости системы. При уровне битовой ошибки  $10^{-4}$  выигрыш в отношении сигнал-шум составляет порядка 8 дБ.

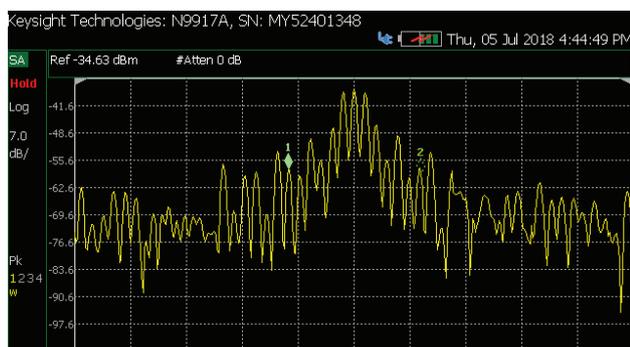
Для подтверждения корректности работы имитационной модели было проведено экспериментальное исследование системы передачи информации, использующей совместное приме-



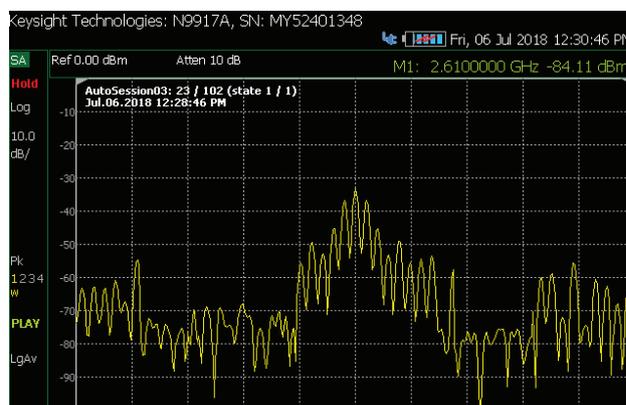
а)

б)

Рис. 4



а)



б)

Рис. 5

нение поворота сигнального созвездия и предкодирования.

Экспериментальная установка обеспечивает лабораторное моделирование процесса формирования OFDM-сигнала с использованием заявленного метода снижения пик-фактора.

На рис. 4 представлена структурная схема и общий вид экспериментальной установки.

В данной экспериментальной установке электрический сигнал генерируется при помощи программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) Altera Stratix III EP3SL150F1152C2 совместно с электронной платой, выполняющей функцию захвата данных и генерации испытательного сигнала для высокоскоростных ЦАП Altera Data Conversion Card Terasic. Форма импульса, генерируемого ПЛИС может быть изменена и управляется с помощью ПК.

Проектирование формы сигнала осуществляется в среде автоматизированного проектирования для написания, компиляции и моделирова-

ния программного пакета Altera Quartus II; в качестве входных данных используются параметры входного и выходного сигнала (ширина частотной полосы сигнала, пиковая мощность, частота дискретизации); параметры сигнала выбираются исходя из формы сигнала, полученного с помощью имитационного моделирования.

Источником сигнала для экспериментальной установки является ПЛИС Altera Stratix III. Далее сигнал с ПЛИС поступает на один из входов радиочастотного смесителя Mini-Circuits ZX05-U712H+, на второй вход которого поступает сигнал с генератора ВЧ колебаний – портативного сверхширокополосного синтезатора гармонических сигналов (ССГС) Micran PLG06 (несущая частота 5 ГГц). После этого модулированный электрический сигнал усиливается для передачи по каналу связи и поступает на широкополосный цифровой анализатор спектра FieldFox N 9917A, проводящий измерения в диапазоне частот 30 кГц – 18 ГГц. В этом блоке происходит

снятие спектральных характеристик сигнала, определяется его максимальная и средняя мощность и становится возможным непосредственное определение пик-фактора сигнала. На рис. 5 показаны спектры сигналов – а) без обработки и б) с использованием функции предкодирования ДНТ и поворотом сигнального созвездия на угол 16,8 град (тип модуляции 16-QAM).

В данном примере использовалась одинаковая максимальная мощность передаваемого сигнала в полосе 8 МГц равная минус 37,5 дБм. Средняя мощность для сигнала без обработки равна минус 54,4 дБм, сигнала с обработкой – минус 50,1 дБм, т. е. пик-фактор сигнала уменьшился на 4,3 дБ, что показывает полное соответствие с результатами имитационного моделирования.

Был проведен ряд экспериментов для различного числа поднесущих, вида модуляции и угла поворота созвездия, типа используемых функций предкодирования. Анализ полученных данных показывает, что при увеличении числа поднесущих от 128 до 1024, пик-фактор передаваемого сигнала увеличивается в среднем на 1 дБ на каждое удвоение числа поднесущих. Использование многопозиционных видов модуляции также увеличивает пик-фактор. Так, при использовании вида модуляции 256-QAM, пик-фактор возрастает на 4 дБ в сравнении с модуляцией QPSK. Использование предкодирования совместно с поворотом сигнального созвездия эффективно уменьшает пик-фактор сигнала во всех рассмотренных случаях. Максимальные значения уменьшения пик-фактора (6,5 дБ) были получены для 16-QAM модуляции на 128 поднесущих при использовании функции предкодирования DFT. С ростом числа поднесущих до 1024, т. е. для режима передачи 1К в стандарте DVB-T2, уменьшение пик-фактора достигает величины 3 дБ для функции ДНТ

Таким образом, экспериментально показано, что использование предкодирования совместно с поворотом сигнального созвездия является эффективным средством для повышения энергетической эффективности систем связи, использующих OFDM, оно позволяет более полно использовать рабочий диапазон усилителей мощности и избежать нелинейных искажений при передаче сигнала по каналу связи.

Имитационное моделирование показывает, что применение поворота сигнального созвездия на рекомендованный угол при заданном виде модуляции дает выигрыш в отношении сигнал-шум

от 5 до 8 дБ при заданном уровне коэффициента битовой ошибки. Таким образом использование данного метода повышает помехоустойчивость систем связи, использующих OFDM.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00123).

### Список литературы

1. Farhang-Boroujeny B., Moradi H. OFDM inspired waveforms for 5G // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18. № 4. P. 2474–2492.
2. Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective / ed. by Fei Hu. Boca Raton: CRC Press, 2016. 556 p.
3. Schaich F., Wild T., Chen Y. Waveform contenders for 5G – suitability for short packet and low latency transmissions // 2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). 2014. P. 1–5.
4. Прокис Дж. Цифровая связь; пер. с англ. / под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2007. 1104 с.
6. Ochiai H., Imai K. On the distribution of the peak-to-average power ratio in OFDM signals // IEEE Trans. Commun. 2001. Vol. 49. № 2. P. 282–289.
7. Slimane S.B. Reducing the peak-to-average power ratio of OFDM signals through precoding // IEEE Trans. Veh. Technol. 2007. Vol. 56. № 2. P. 686–695.
8. Falconer D. Linear precoding of OFDMA signals to minimize their instantaneous power variance // IEEE Trans. on Commun. 2011. Vol. 59. № 4. P. 1154–1162.
9. Reine R., Zang Z. Pulse shaping approach to PAPR reduction for multiuser OFDM systems // 11th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 2016. P. 2076–2080.
10. Ochiai H., Imai K. On Clipping for peak power reduction of OFDM signals // IEEE GTC. 2000. Vol. 2. P. 731–735.
11. Slimane S.B. Peak-to-average power ratio reduction of OFDM signals using pulse shaping // IEEE Globecom. 2000. Vol. 3. P. 1412–1416.
12. Slimane S.B. Peak-to-average power ratio reduction of OFDM signals using broadband pulse shaping // Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf. 2002. Vol. 2. P. 889–893.
13. Armstrong J. Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering // IEEE Electronics Lett. 2002. Vol. 38. № 5. P. 246–247.
14. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB / Y.S. Cho // IEEE PRESS John Wiley & Sons. 2010. P. 111–135.
15. Малышев Н. Технологии связи LTE. OFDM-сигналы. Снижение пик-фактора (PAPR) OFDM-сигналов // Элек-

- тронный ресурс. URL: <http://nikellanjilo.ru/?p=1856> (дата обращения 01.08.2018).
16. Slimane S.B. Reducing the peak-to-average power ratio of OFDM signals through precoding // IEEE Trans. Veh. Technol. 2007. Vol. 56. № 2. P. 686–695.
17. Aboul-Dahab M.A., Hagraas E.A., Elhaseeb A.A. PAPR reduction based on DFT precoding for OFDM signals // International Journal of Future Computer and Communication. 2013. Vol. 2. № 4. P. 325–328.
18. Sivaram A.V., Rao R.S. PAPR reduction of DHT and WHT-precoded OFDM system for M-QAM // ITSI Transactions on Electrical and Electronics Engineering. 2013. Vol. 1. P. 113–117.
19. Report ITU-R BT.2254-3 (03/2017) Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2. // Электронный ресурс. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BT.2254-3-2017-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BT.2254-3-2017-PDF-E.pdf) (дата обращения 01.08.2018).

---

## OFDM system energy efficiency increasing method based on peak-factor decrease

*A.Kh. Sultanov, I.K. Meshkov, A.A. Ishmiyarov*

In this work the peak-factor decreasing method for the OFDM systems is proposed, based on the group spectrum subcarriers processing and the signal constellation rotation. Such parameters of the OFDM system as the instantaneous value of the peak-factor, the bit error probability of the receiving signal, the selective (empirical) distribution function of the peak-factor values depending on the precoding functions are estimated. An experimental research confirming the effectiveness of the proposed method was carried out. Theoretical work significance consists in discrete functions using for precoding and simultaneous signal conversion on each subcarrier. Practical novelty consists in the possibility of using the developed method of reducing the peak factor in the DVB-T2 standard digital television systems. The application of the proposed method will make possible the fully use of the power amplifiers operation range and to avoid nonlinear signal distortions. The receiving BER level will be decreased by the signal constellation rotation to the recommended angle for the given modulation type.

*Keywords:* OFDM, PAPR, precoding, nonlinear distortion, rotation of signal constellation, discrete functions, distribution function, BER, energy efficiency.

---