

Научная статья
УДК 621.391
DOI: [10.34759/trd-2022-126-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-14)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛИППИРОВАНИЯ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА OFDM-СИМВОЛОВ

Александр Александрович Бахтин¹, Алексей Станиславович Волков^{2✉},

Алексей Викторович Солодков³, Евгений Вадимович Елецких⁴

^{1,2,3,4}Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

Москва, Зеленоград, Россия

¹bah@miee.ru

²leshvol@mail.ru ✉

³solodkovaw@gmail.com

⁴EvgenyEletskikh@yandex.ru

Аннотация. Одним из главных недостатков современных OFDM-систем является большое значение пик-фактора. Как следствие, большую часть времени передатчик работает на сниженной мощности. Существует множество методов снижения пик-фактора при передаче, однако все они либо уменьшают среднюю мощность передаваемого сигнала, либо являются весьма аппаратно затратными, что не всегда оправдано.

В данной статье предлагается метод снижения пик-фактора, основанный на предыскажении сигнала перед его передачей с помощью интерполирующей функции, не изменяя максимальной мощности передаваемых OFDM-символов.

Такой метод является простым и нетребовательным по сравнению с существующими аналогами.

В результате применения данного метода к математической модели OFDM-системы, было получено увеличение средней мощности передачи на 0,73 дБ и уменьшение величины PAPR на 0,8 дБ для модуляции QAM-64.

Ключевые слова: прием радиосигналов, цифровая модуляция, предискажение, клиппирование, пик-фактор, OFDM, PAPR

Для цитирования: Бахтин А.А., Волков А.С., Солодков А.В., Елецких Е.В. Исследование влияния клиппирования на помехоустойчивость приема OFDM-символов // Труды МАИ. 2022. № 126. DOI: [10.34759/trd-2022-126-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-14)

Original article

A RESEARCH OF INFLUENCE OF CLIPPING ON OFDM SYSTEM PERFORMANCE

Alexander A. Bakhtin¹, Alexey S. Volkov²✉, Alexey V. Solodkov³,

Evgeny V. Eletsikh⁴

^{1.2.3.4}National Research University of Electronic Technology,

Moscow, Zelenograd, Russia

¹bah@miec.ru

²leshvol@mail.ru✉

³solodkovaw@gmail.com

⁴EvgenyEletsikh@yandex.ru

Abstract. In modern terrestrial radio communications, OFDM technology is widely used, since it allows you to generate a signal that makes maximum use of the entire available spectrum and is resistant to interference in the channel. Moreover, OFDM system can work in multipath channel and fading condition.

However, one of the disadvantages of OFDM systems is the high value of the ratio of the maximum power of the transmitted signal to its average value - the peak factor. This problem arises due to the use of such modulations as QAM-16, QAM-64 and QAM-256, where the difference in the power of the transmitted symbols varies greatly depending on the points of the signal constellation corresponding to the symbols. For example, for QAM-256, the powers of the transmitted symbols may differ by 225 times (with a minimum distance of two). This leads to high requirements for the linearity of the amplifier on the transmitter, which, moreover, operates at a reduced average power. As a consequence, a large output power of the radio path is required, which, at the same time, is not used.

To overcome the described problem, various methods are used, aimed either at linearization of the amplifier directly or indirectly by signal conversion. Such schemes greatly increase the requirements for the computing power of the transmitter and complicate the radio path.

To reduce the price of the radio path and the use of computers with limited resources, it is necessary to choose a compromise method for reducing the peak factor, for example, static distortion of the constellation, which is a special case of the signal clipping method.

In this paper, it was decided to find the most accessible from the point of view of hardware implementation, therefore, in this paper we study another kind of clipping method, the essence of which is to expand the signal constellation so that the symbols with the highest energy do not change, and all other symbols are on the constellation as far as possible from the center, but do not exceed the maximum value power.

In the process of developing the clipping method, a model of the OFDM system was designed.

When studying the effect of the developed clipping method on a channel with only AWGN, the system demonstrated the best results for QAM-64 modulation. The average transmission power increased by 0.73 dB, and the PAPR value decreased by 0.8 dB. There was also a loss of noise immunity by 1 dB at the bit error rate level of 10^{-3} . Such results make it possible to use this method in very hardware-limited systems where other methods are not applicable.

When nonlinear distortions appear in the channel, it was found that the clipping method is not able to cope with such changes on its own and it is required to use it in combination with other methods of reducing PAPR in the channel, such as, for example, the use of soft decoding FEC.

Keywords: signal receiving, digital modulation, predistortion, clipping, PAPR, OFDM

For citation: Bakhtin A.A., Volkov A.S., Solodkov A.V., Eletsikh E.V. A research of influence of clipping on OFDM system performance. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. DOI: [10.34759/trd-2022-126-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-14)

Введение

В современной наземной радиосвязи повсеместно используется технология OFDM, поскольку она позволяет формировать сигнал, максимально использующий весь доступный спектр и устойчивый к помехам в канале, кроме того, позволяет бороться с замираниями.

Однако одним из недостатков OFDM-систем является большое значение отношения максимальной мощности передаваемого сигнала к ее среднему значению, т.н. пик-фактор, PAPR. Эта проблема возникает вследствие использования таких модуляций, как QAM-16, QAM-64 и QAM-256, где разница в мощности передаваемых символов сильно колеблется в зависимости от соответствующих символам точек сигнального созвездия. Например, для QAM-256 мощности передаваемых символов могут отличаться в 225 раз (при минимальной дистанции, равной двум). Это приводит к высоким требованиям к линейности усилителя на передатчике, который, к тому же, работает на сниженной средней мощности. Как следствие, необходима большая выходная мощность радиотракта, которая, при этом, почти не используется [1-4].

Для преодоления описанной проблемы применяются различные методы, направленные либо на линеаризацию усилителя напрямую, либо косвенно, путем преобразования сигнала. Подобные схемы сильно повышают требования к вычислительным мощностям передатчика и усложняют радиотракт.

Для снижения стоимости радиотракта и использования вычислителей с ограниченными ресурсами необходимо выбрать компромиссный метод уменьшения

пик-фактора, например, статическое искажение созвездия, которое является частным случаем метода клиппирования сигнала.

Целью данной работы является изучение эффекта клиппирования и его влияния на характеристики радиосвязи [5].

Анализ существующих методов снижения PAPR

Для снижения пик-фактора сигналов OFDM применяются методы, которые условно можно разделить на следующие классы [6]:

- методы, основанные на блочном кодировании (коды, построенные на основе комплементарных последовательностей Голея, кодов Рида-Маллера, методы добавления поднесущих);
- методы, основанные на амплитудном ограничении сигналов (клиппирование, компандирование, фильтрация);
- вероятностные методы (методы избранных отображений, неполных последовательностей, расширения сигнальных созвездий).

Разумеется, также существуют методы, являющиеся комбинацией методов разных классов.

Методы снижения пик-фактора с помощью блочного кодирования являются одними из самых эффективных, однако они являются очень требовательными к аппаратно-вычислительным возможностям оборудования, на котором работают, поэтому их используют, как правило, при низкой относительной скорости кодирования (не больше $r_c = 0,5$) [7].

Для значительного снижения пик-фактора сигналов OFDM с большим количеством поднесущих методами блочного кодирования и сохранения при этом неизменной скорости передачи данных требуются дополнительные поднесущие, на которых будут передаваться проверочные символы кодовых слов. Увеличение количества поднесущих в заданной полосе частот возможно путем их введения в участки по краям полосы частот. Эти участки полосы частот освобождаются в случае, когда на поднесущих частотах будут применяться спектрально-эффективные методы модуляции, обеспечивающие снижения уровня внеполосных излучений. Также техническая сложность применения данного метода заключается в проблемах нахождения наилучших кодов и хранения больших таблиц для кодирования и декодирования, особенно при большом количестве поднесущих.

Другим методом снижения пик-фактора сигналов является применение на каждой поднесущей частоте оптимальных сигналов, формы которых получены в результате решения оптимизационной задачи, при наличии ограничений на величину пик-фактора колебаний и уровень внеполосных излучений [8].

Техника скремблирования заключается в том, что входные блоки данных OFDM-символов скремблируются между собой, после чего из них выбирается тот символ, для которого значение пик-фактора минимально. При таком подходе уменьшается вероятность появления высокого пик-фактора. Недостатком такого метода является уменьшение спектральной эффективности сигнала, и увеличение сложности реализации, возрастающее с увеличением количества поднесущих. Помимо этого, метод совершенно не гарантирует полного исчезновения высоких всплесков значения PAPR [9-12].

Метод клиппирования сигнала

Описанные выше методы достаточно требовательны к вычислительным ресурсам аппаратной базы, что делает их не всегда возможными к использованию вследствие ограниченности этих ресурсов и удорожания конечного продукта. В отличие от этих методов, клиппирование сигнала является весьма дешевым, с точки зрения аппаратных затрат, вариантом, поскольку ключевые значения параметров статичны и вычисляются еще при проектировании системы [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Существуют различные виды клиппирования, но основной идеей этого метода является обрезание всплесков OFDM сигнала, превышающих заданное пороговое значение A .

В классическом клиппировании выходное значение функции амплитуды определяется следующим выражением:

$$f(x(t)) = \begin{cases} x(t), & x(t) \leq A \\ A, & x(t) > A \end{cases}, \quad (1)$$

где $x(t)$ – амплитуда входного сигнала. Как представлено на рисунке 1, выходная амплитуда сигнала линейна, если ее значение не превышает порогового, в противном случае она равна величине A .

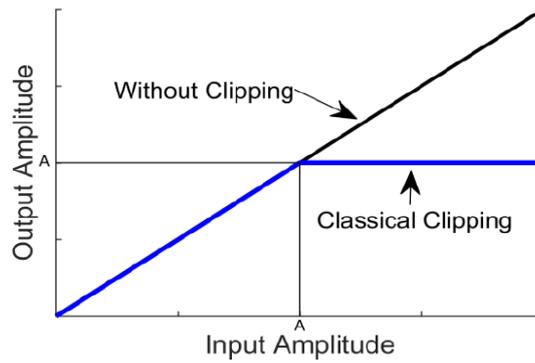


Рисунок 1 – Функция классического клиппирования [13]

При таких жестких ограничениях можно предположить, что метод клиппирования имеет следующие недостатки:

- приводит к внутриполосным искажениям сигнала, в результате которых увеличивается показатель вероятности битовой ошибки;
- приводит к внеполосным излучениям, которые влияют на смежные каналы. Уровень таких излучений может быть уменьшен с помощью фильтрации, которая при этом может отрицательно повлиять на компоненты несущего сигнала.
- фильтрация ограниченного по амплитуде сигнала может привести к снижению внеполосных излучений, ценой повторного возрастания пика. Сигнал после операции фильтрации может превышать заданный уровень ограничения.

На рисунке 2 приведена диаграмма схемы уменьшения пик-фактора, использующая подход амплитудного ограничения и фильтрации. На рисунке L – коэффициент передискретизации, а N – количество поднесущих [13-17].

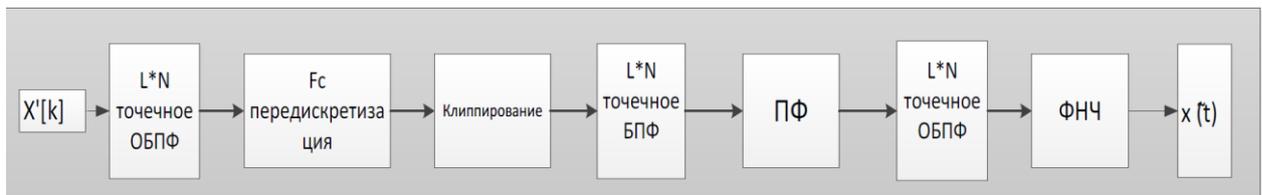


Рисунок 2 – Схема уменьшения пик-фактора, использующая подход амплитудного ограничения и фильтрации [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]

Целью данной работе было определение и исследование наименее требовательного с точки зрения аппаратной реализации способа клиппирования, суть которой заключается в расширении сигнального созвездия так, чтобы символы с наибольшей энергией не изменялись, а все остальные символы были на созвездии как можно дальше от центра, но не превышали максимального значения мощности.

Описание математической модели

На сегодняшний день в системах связи с OFDM наиболее распространено использование таких модуляций, как BPSK, 8-PSK, QAM-16, QAM-64, QAM-256, поэтому именно им было уделено наибольшее внимание в ходе выполнения данной работы [18].

Как описывалось ранее, значение PAPR представляет из себя отношение максимальной мощности сигнала к её среднему значению. В таких модуляциях как M-PSK и QAM-4 все точки сигнального созвездия имеют одинаковую мощность, а, значит, PAPR в таких модуляциях равен единице. Поскольку задача состояла в том, чтобы увеличить среднюю мощность сигнала, не повышая пиковой, разрабатывался метод клиппирования именно для модуляций QAM-16, QAM-64 и QAM-256 [1920].

При таком подходе искажение сигнала происходило бы только по амплитуде, не затрагивая фазу, поскольку в противном случае сложность системы очень быстро вырастает, что противоречит поставленной цели разработать дешевый в аппаратном плане метод.

В общем случае гамма-коррекция описывается следующим выражением:

$$A_{out} = A_{in}^{\gamma}, \quad (2)$$

где A_{out} и A_{in} – выходные и входные значения сигнала, а γ – гамма-коэффициент.

На рисунке 3 представлена схема блока клиппирования.

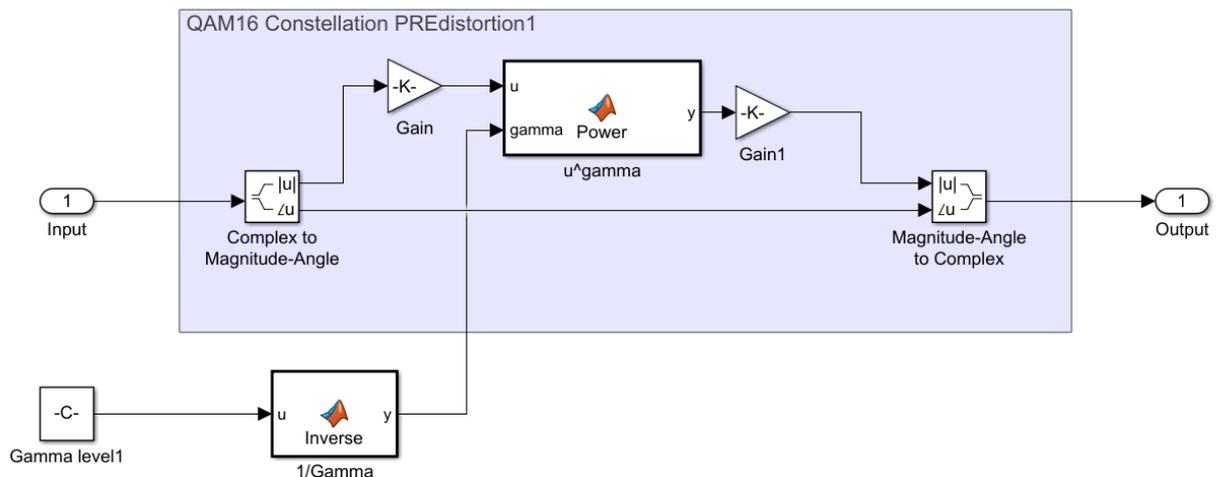


Рисунок 3 – Схема блока клиппирования

Коэффициент γ задается в блоке *Gamma level* и выбирается, как правило, на полуинтервале $(0, 2]$ [20]. В блоках *Gain* происходит нормализация значений сигнала на отрезок $[0, 1]$ и последующий возврат на прежние уровни. Блоки *Inverse* и *Power* производят поиск обратного входному значению и возведения в степень *Gamma* соответственно.

На рисунке 4 представлена схема блока восстановления.

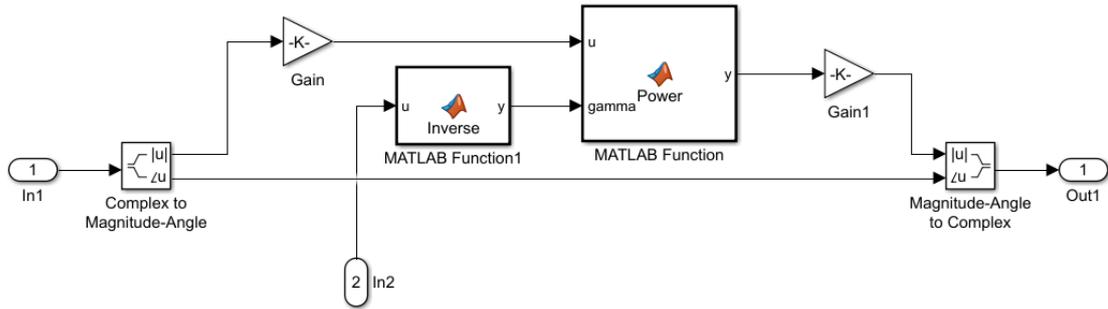


Рисунок 4 – Схема блока восстановления

На рисунке 5 представлена собранная схема OFDM-системы с клиппированием для модуляции QAM-16.

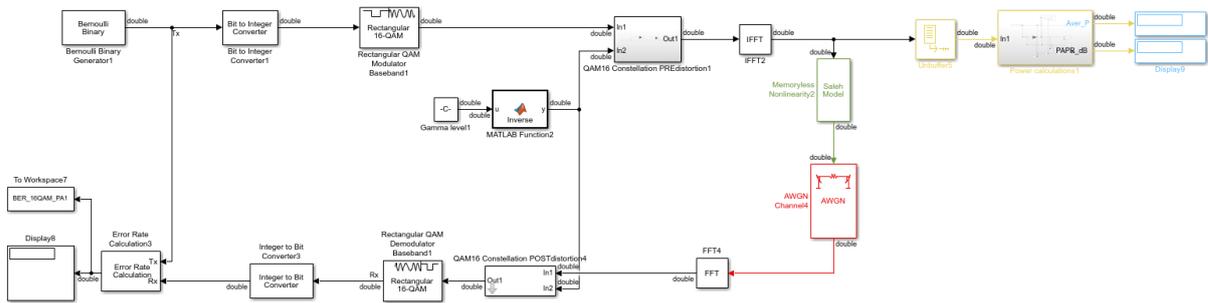


Рисунок 5 - Схема OFDM-системы с клиппированием

Поскольку в реальных системах связи используются неидеальные усилители мощности (УМ) на выходе передатчика, было решено использовать УМ на основе модели Салеха.

Так как необходимо увеличить среднюю мощность передачи, исследовались значения $\gamma \in \left\{0, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}\right\}$, т.к. при значениях больше единицы, точки сигнального

созвездия будут стягиваться к центру, тем самым наоборот уменьшая среднюю мощность.

Для всех типов модуляции и значений γ необходимо оценить значение PAPR, средней мощности передачи, а также итоговые характеристики системы.

Обзор результатов моделирования без УМ

Для проверки результатов была разработана эталонная модель FDM-системы без усилителя мощности, чтобы была возможность оценить работу описанного метода в канале с АБГШ. На рисунке 6 представлены результаты воздействия метода клиппирования на передаваемый и принимаемый сигнал. В качестве примера приведены только созвездия для QAM-16 для значения $\gamma = 0,5$.

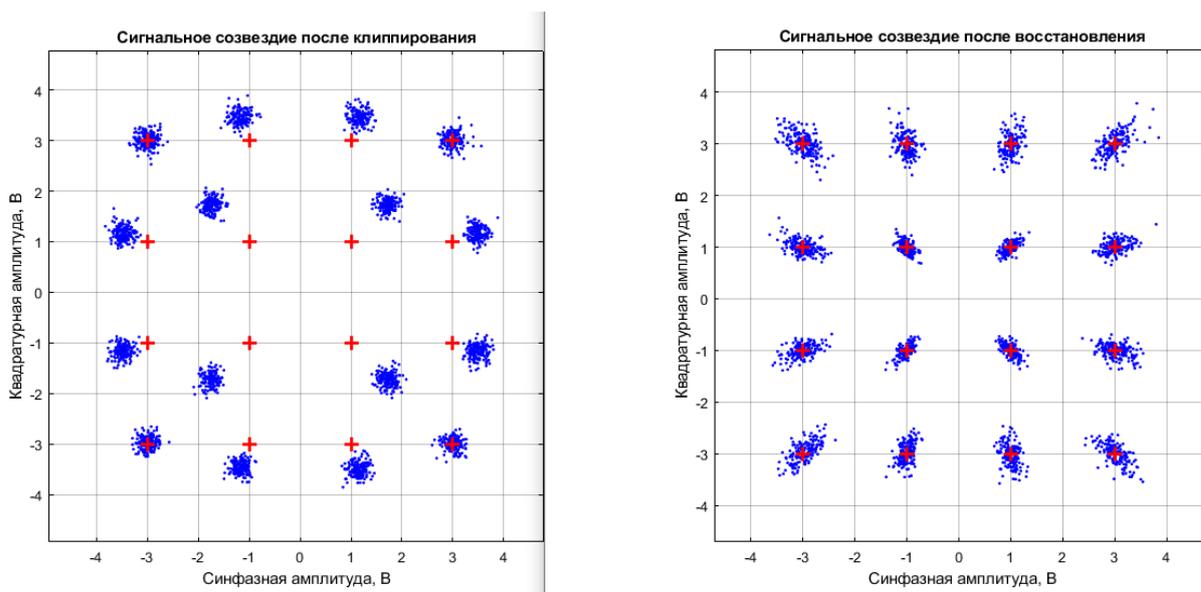


Рисунок 6 – Созвездия сигнала на выходе блока клиппирования (слева) и на выходе блока восстановления (справа); $\gamma = 0,5$; $E_b/N_0 = 20$ дБ

Для оценки качества работы метода в отсутствие УМ, были построены графики зависимости BER от отношения E_b/N_0 при разных значениях коэффициента γ , приведенные на рисунке 7.

В таблице 1 приведены данные зависимости средней мощности и пик-фактора от используемой модуляции и величины γ .

Таблица 1 – Характеристики сигнала на передатчике для выбранных модуляций при различных значениях γ

Модуляция	γ	P_{av} , кВт	$P_{av,CL}$, кВт	ΔP_{av} , дБ	$PAPR$, дБ	$PAPR_{CL}$, дБ
QAM-16	0	10,3	18,4	2,52	32,6	30,1
	0,5		12,9	1,06		31,7
	0,75		11,5	0,47		32,2
QAM-64	0	43,1	100,4	3,89	33,8	30,1
	0,5		62,0	1,54		32,2
	0,75		51,0	0,73		33,0
QAM-256	0	172,7	460,8	4,15	34,4	30,1
	0,5		260,0	1,88		32,6
	0,75		211,6	0,88		33,5

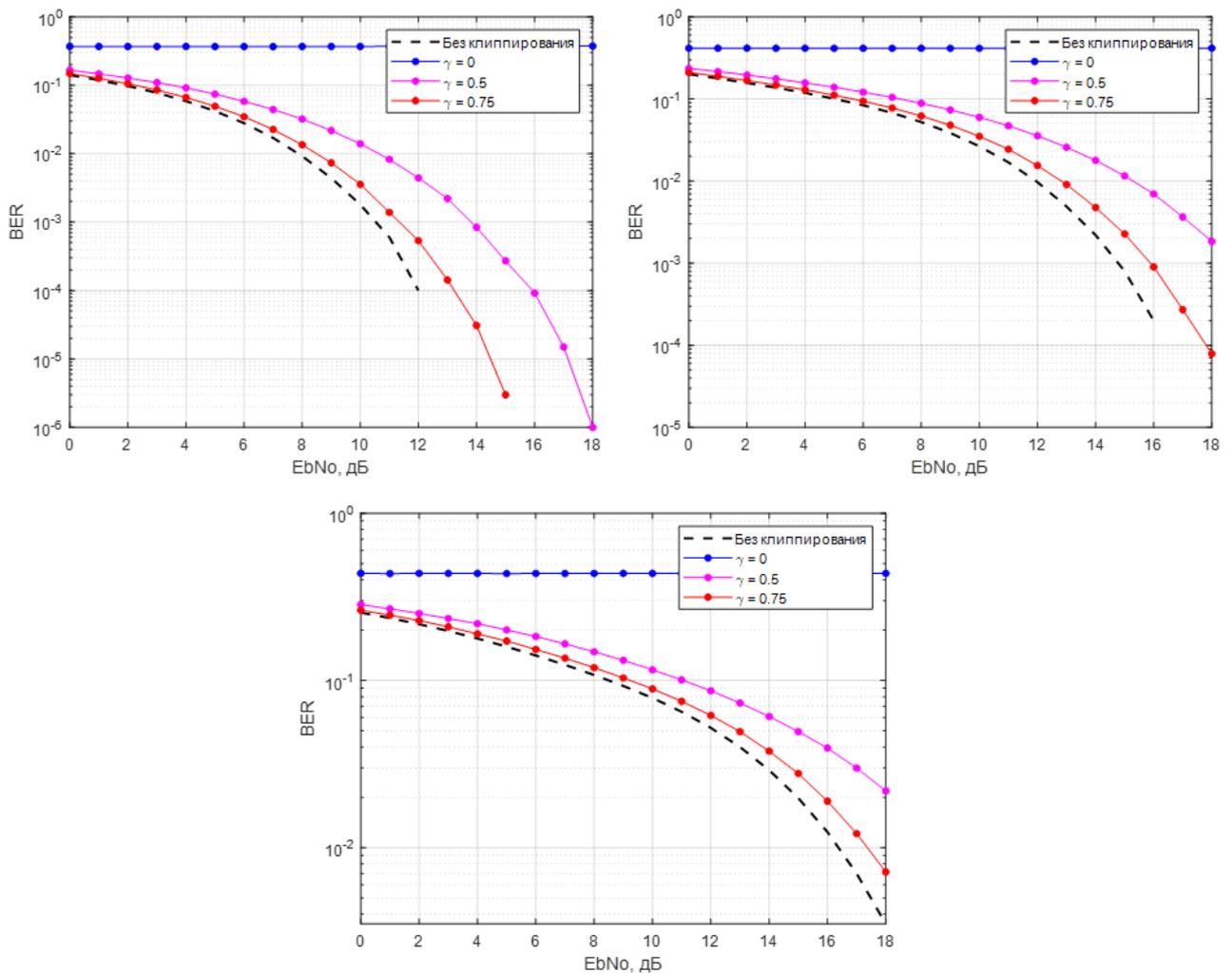


Рисунок 7 – Сравнительный график помехоустойчивости модуляции QAM-16 (сверху слева), QAM-64 (сверху справа) и QAM-256 (снизу) с использованием клиппирования и без него

На основании результатов, приведенных в таблице 1 и рисунке 7, было выявлено, что наибольший выигрыш по мощности и полученному значению PAPR достигается при $\gamma = 0,75$ и модуляции QAM-64. Поэтому дальнейшие исследования проводились именно для этого случая.

Обзор результатов моделирования с УМ

Необходимо исследовать работу клиппирования в канале не только с АБГШ, но и с нелинейными искажениями. В качестве источника нелинейных искажений была выбрана модель УМ Салеха со следующими параметрами:

$$\alpha_m = 1,6623, \quad \beta_m = 0,0552, \quad \alpha_\varphi = 0,1533, \quad \beta_\varphi = 0,3456.$$

Для количественной оценки степени искажения сигнальных созвездий удобно использовать параметр модуль вектора ошибки (англ. *Error Vector Magnitude, EVM*), вычисляемый как отношение суммарной ошибки к пиковому значению полезных данных. Данный параметр выражается в процентах. Физически EVM представляет собой усредненное нормированное евклидово расстояние между координатами идеального и искаженного созвездия.

Результаты измерений EVM для системы с клиппированием и без УМ, без клиппирования и с УМ, с клиппированием и с УМ для модуляции QAM-64 представлены на рисунке 8.

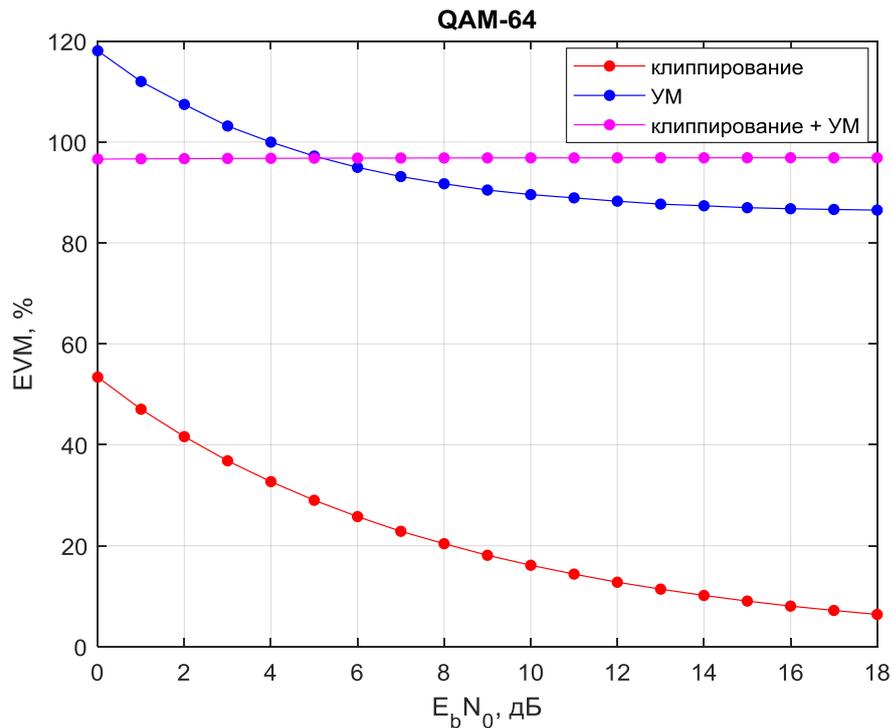


Рисунок 8 – График EVM для модуляции QAM-64 в зависимости от отношения E_b/N_0

Значения вероятности битовой ошибки при использовании УМ представлены на рисунке 9. На рисунке 10 представлены характеристики усилителя мощности для разных модуляций в канале с клиппированием по сравнению с каналом без клиппирования. Из графиков видно, что появление нелинейных искажений привело к низкой эффективности метода клиппирования. Так, удалось достигнуть снижения искажений типа АМ-АМ не более чем на 10%. Следовательно, борьба с нелинейными искажениями в УМ должна осуществляться другими способами, которые можно использовать в совокупности с методом клиппирования.

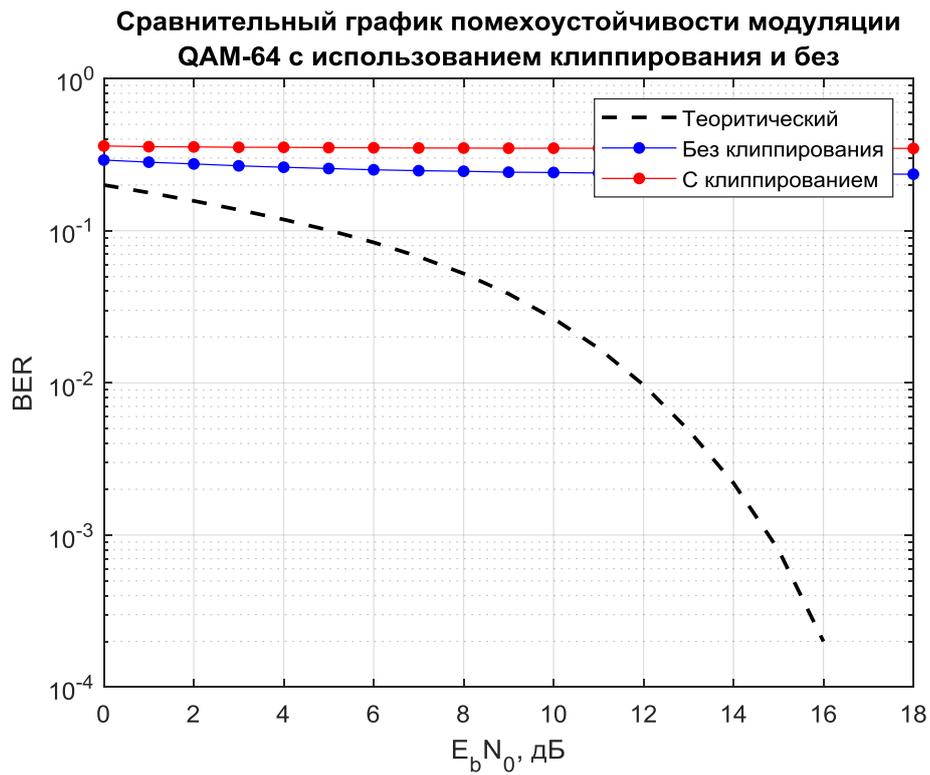


Рисунок 9 – График зависимости вероятности битовой ошибки от отношения E_b/N_0 в системе с усилителем мощности для модуляции QAM-64

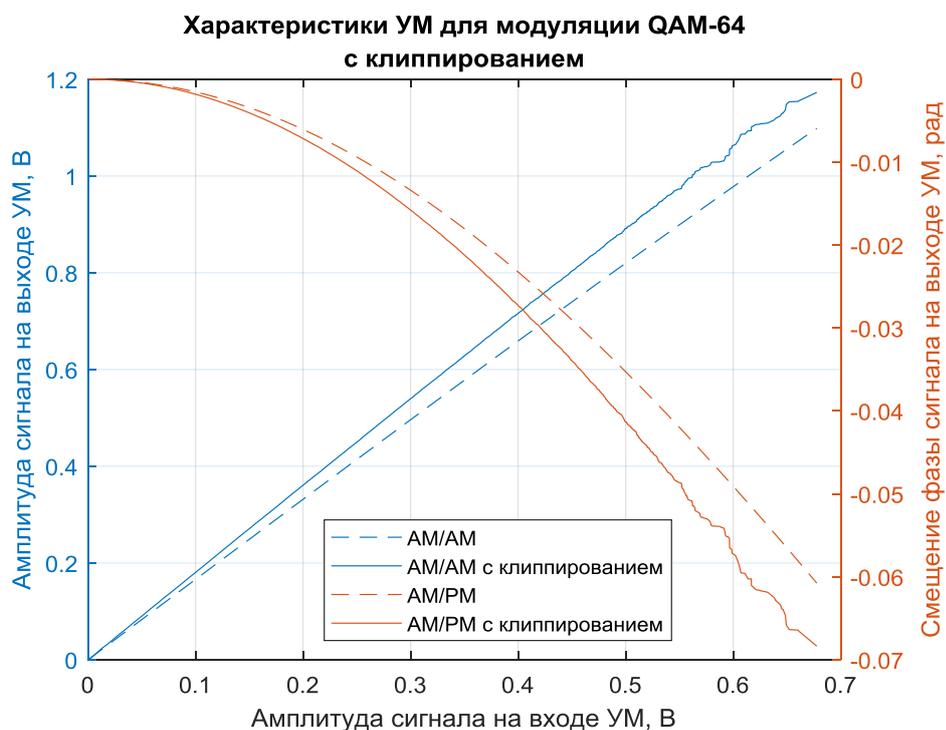


Рисунок 10 – Характеристики УМ для модуляции QAM-64 с клиппированием и без него

На основе полученных данных была составлена таблица 2, в которой представлены характеристики канала с нелинейными искажениями.

Таблица 2 – Характеристики канала с нелинейными искажениями для выбранных модуляций при использовании метода клиппирования и без него для случая $\gamma = 0,75$

Модуляция	P_{av} , Вт	$P_{av,CL}$, Вт	$PAPR$, дБ	$PAPR_{CL}$, дБ
QAM-16	0,027	0,030	10,63	10,53
QAM-64	0,113	0,133	11,18	11,08
QAM-256	0,441	0,535	10,21	10,03

Возможные улучшения системы

Поскольку предложенный метод не компенсирует в должной мере искажения в УМ, можно дополнить его различными расширениями, такими как введение дополнительных линейных усилителей, использование кодов с мягкими методами декодирования или ввести в схему цепь обратной связи, которая бы компенсировала последствия воздействия нелинейного усилителя.

Кроме того, предполагается, что повышенная средняя мощность сигнала позволит повысить вероятность достоверного приема в случае работы в реальных каналах с переотражениями.

Заключение

Одной из главных проблем OFDM-систем на сегодняшний день является высокое значение величины пик-фактора. Существуют эффективные методы снижения PAPR, но все они являются очень требовательными к аппаратно-вычислительной части платформы, на которой реализуются. В связи с этим, особенно для развития отечественного производства SDR-приемников, необходимы новые недорогие методы уменьшения пик-фактора, которые будут показывать результаты, близкие к имеющимся аналогам.

В качестве одного из таких методов была разработана схема клиппирования, основанная на предискажении сигнала после формирования сигнального созвездия таким образом, чтобы максимально далеко от центра созвездия расположить все точки. Предискажение проводилось с помощью гамма-коррекции символов входящего сигнала.

В процессе разработки метода клиппирования была собрана модель OFDM-системы.

При исследовании влияния разработанного метода клиппирования на канал с одним только АБГШ система продемонстрировала наилучшие результаты для модуляции QAM-64. Средняя мощность передачи увеличилась на 0,73 дБ, а значение PAPR уменьшилось на 0,8 дБ. Также произошли потери помехоустойчивости на 1 дБ по уровню ошибки 10^{-3} . Такие результаты позволяют использовать данный метод в очень аппаратно-ограниченных системах, где другие методы не применимы

При появлении в канале нелинейных искажений было установлено, что метод клиппирования не способен самостоятельно справляться с подобными изменениями и требуется использовать его в совокупности с другими методами уменьшения PAPR в канале, такими как, например, использование кодов с мягким декодированием.

Список источников

1. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Имитационное моделирование адаптивных сетей связи. – М.: Изд-во МАИ, 2020. – 160 с.
2. Шевцов В.А., Кирдяшкин В.В., Тимошенко А.В., Разиньков С.Н. Экспериментальные оценки угловых координат и местоположения источников радиоизлучений в беспилотных авиационных комплексах мониторинга // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. № 3. С. 187-194.
3. Казак П.Г., Шевцов В.А. Принципы построения энергоэффективной системы сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа в Интернет для Арктики //

Труды МАИ. 2021. №118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158239>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-06)

4. Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Миронов Ю.Б. Схемы модуляции для систем сотовой связи 5G/IMT-2020 и 6G // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 3. С. 11-17.
5. Гуреев А.В., Тай Зар Линн, Миронов, Ю.Б. Повышение производительности мобильной беспроводной сети путем адаптации ее частотного плана // Естественные и технические науки. 2012. № 2 (58). С. 308-310.
6. Ochai H. Analysis and Reduction of Peak to Average Power Ratio in OFDM Systems, PhD Thesis, The Graduate School of Engineering, The university of Tokyo, Japan. 2001.
7. Tellambura C. Coding technique for reducing peak-to-average power ratio in OFDM // In Proceeding of the IEEE Global Telecommunication Conference, 1998, vol. 5, pp. 2783-2787. DOI:[10.1109/GLOCOM.1998.776495](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.1998.776495)
8. Krongold B.S. New Techniques for Multicarrier Communication Systems, Ph.D Thisis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.
9. Van Eetvelt P., Wade G., Tomlinson M. Peak to average power reduction for OFDM schemes by selective scrambling // Electronic Letters. 1996, vol. 32, no. 21, pp. 1963-1964.
10. Wilkinson T.A., Jones A.E. Minimization of the Peak-to-Mean Envelope Power Ratio of Multicarrier Transmission Schemes by Block Coding // IEEE Vehicular Technology Conference, Chicago, IL. July 1995, pp. 825-829. DOI: [10.1109/VETEC.1995.504983](https://doi.org/10.1109/VETEC.1995.504983)

11. Shrivastava S., Gupta R. PAPR Reduction Methods in OFDM Systems // International Journal of Advanced Research in Computer Science, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 100-104.
12. Deepa D., Poongodi C., Sandhiyadevi P., Mohanapriya G.K. Reduction of Peak Power in OFDM Signal Using Cyclic Shifting in Partial Transmit Method // IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, 2021, vol. 1084, no. 1. DOI: [10.1088/1757-899X/1084/1/012049](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1084/1/012049)
13. Витязев В.В., Никишев П.Б. Исследование технологий OFDM, f-OFDM и sub-OFDM при работе в канале связи с аддитивным белым гауссовским шумом // 24 Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPA-2022)»: сборник трудов. – М.: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. С. 101-103.
14. Muller S.H., Huber J.B. A Novel Peak Power Reduction Scheme for OFDM // Proceedings of the PIMRC, Helsinki, Finland, Sept. 1997, pp. 1090-1094.
15. Cimini L.J., Sollenberger N.R. Peak to Average Power Ratio Reduction of an OFDM Signal Using Partial Transmit Sequences // IEEE Communications Letters, 2000, vol. 4, no. 3, pp. 86-88. DOI: [10.1109/4234.831033](https://doi.org/10.1109/4234.831033)
16. Tellambura C. Improved Phase Factor Computation for the PAR Reduction of an OFDM Signal Using PTS // IEEE Communications Letters, 2001, vol. 5, no. 4, pp. 135-137. DOI: [10.1109/4234.917092](https://doi.org/10.1109/4234.917092)
17. Han S.H., Lee J.H. PAPR Reduction of OFDM Signals Using a Reduced Complexity PTS Technique // IEEE Signal Processing Letters, 2004, vol. 11, no. 11, pp. 887-890.

URL: <https://doi.org/10.1109/lsp.2004.833490>

18. B. Bakkas, R. Benkhouya, I. Chana, H. Ben-Azza. Palm Date Leaf Clipping: A New Method to Reduce PAPR in OFDM Systems // *Information Journal*, 2020, vol. 11 (4),

DOI: [10.3390/info11040190](https://doi.org/10.3390/info11040190)

19. Software-defined radio. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_radio

20. Яценко С.Ю. Анализ влияния искажений и шумов на помехоустойчивость приема сигналов квадратурной амплитудной модуляции // *Журнал радиоэлектроники*. 2016. № 5. С. 3.

References

1. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. *Imitatsionnoe modelirovanie adaptivnykh setei svyazi* (Simulation modeling of adaptive communication networks), Moscow, Izd-vo MAI, 2020, 160 p.

2. Shevtsov V.A., Kirdyashkin V.V., Timoshenko A.V., Razin'kov S.N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2021, no. 3, pp. 187-194.

3. Kazak P.G., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2021, №118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158239>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-06)

4. Bakulin M.G., Ben Rezheb T.B.K., Kreindelin V.B., Mironov Yu.B. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, 2022, vol. 16, no. 3, pp. 11-17.

5. Gureev A.V., Tai Zar Linn, Mironov, Yu.B. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 2 (58), pp. 308-310.

6. H. Ochai. *Analysis and Reduction of Peak to Average Power Ratio in OFDM Systems*, PhD Thesis, The Graduate School of Engineering, The university of Tokyo, Japan. 2001.

7. Tellambura C. Coding technique for reducing peak-to-average power ratio in OFDM, *In Proceeding of the IEEE Global Telecommunication Conference*, 1998, vol. 5, pp. 2783-2787. DOI:[10.1109/GLOCOM.1998.776495](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.1998.776495)
8. Krongold B.S. *New Techniques for Multicarrier Communication Systems*, Ph.D Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.
9. Van Eetvelt P., Wade G., Tomlinson M. Peak to average power reduction for OFDM schemes by selective scrambling, *Electronic Letters*. 1996, vol. 32, no. 21, 1963-1964.
10. Wilkinson T.A., Jones A.E. Minimization of the Peak-to-Mean Envelope Power Ratio of Multicarrier Transmission Schemes by Block Coding, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Chicago, IL. July 1995, pp. 825-829. DOI: [10.1109/VETEC.1995.504983](https://doi.org/10.1109/VETEC.1995.504983)
11. Shrivastava S., Gupta R. PAPR Reduction Methods in OFDM Systems, *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 100-104.
12. Deepa D., Poongodi C., Sandhiyadevi P., Mohanapriya G.K. Reduction of Peak Power in OFDM Signal Using Cyclic Shifting in Partial Transmit Method, *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1084, no. 1. DOI: [10.1088/1757-899X/1084/1/012049](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1084/1/012049)
13. Vityazev V.V., Nikishev P.B. *24 Mezhdunarodnaya konferentsiya «Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye (DSPA-2022)»: sbornik trudov*. Moscow, Rossiiskoe nauchno-tekhnicheskoe obshchestvo radiotekhniki, elektroniki i svyazi im. A.S. Popova, pp. 101-103.
14. Muller S.H., Huber J.B. A Novel Peak Power Reduction Scheme for OFDM, *Proceedings of the PIMRC*, Helsinki, Finland, Sept. 1997, pp. 1090-1094.

15. Cimini L.J., Sollenberger N.R. Peak to Average Power Ratio Reduction of an OFDM Signal Using Partial Transmit Sequences, *IEEE Communications Letters*, 2000, vol. 4, no. 3, pp. 86-88. DOI:[10.1109/4234.831033](https://doi.org/10.1109/4234.831033)
16. Tellambura C. Improved Phase Factor Computation for the PAR Reduction of an OFDM Signal Using PTS, *IEEE Communications Letters*, 2001, vol. 5, no. 4, pp. 135-137. DOI:[10.1109/4234.917092](https://doi.org/10.1109/4234.917092)
17. Han S.H., Lee J.H. PAPR Reduction of OFDM Signals Using a Reduced Complexity PTS Technique, *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, vol. 11, no. 11, pp. 887-890. URL: <https://doi.org/10.1109/lsp.2004.833490>
18. B. Bakkas, R. Benkhrouya, I. Chana, H. Ben-Azza. Palm Date Leaf Clipping: A New Method to Reduce PAPR in OFDM Systems, *Information Journal*, 2020, vol. 11 (4), DOI: [10.3390/info11040190](https://doi.org/10.3390/info11040190)
19. *Software-defined radio*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_radio
20. Yatsenko S.Yu. *Zhurnal radioelektroniki*, 2016, no. 5, pp. 3.

Статья поступила в редакцию 13.08.2022

Статья после доработки 16.08.2022

Одобрена после рецензирования 11.09.2022

Принята к публикации 12.10.2022

The article was submitted on 13.08.2022; approved after reviewing on 11.09.2022; accepted for publication on 12.10.2022