

## Оптимальная фильтрация при ограничении пик-фактора сигнала DRM+

К.Ю. Морозов

АО «Самарское инновационное предприятие радиосистем»  
443022, Россия, г. Самара,  
пр. Кирова, 26

*Аннотация* – Для снижения пик-фактора в системе DRM+ из-за ограничений, налагаемых стандартом, широко применяются метод ограничения пиков (клиппинг) и метод оконного взвешивания, которые основаны на искажении сигнала. В результате применения данных методов существенно возрастают внеполосные излучения в спектре сигнала. После фильтрации внеполосных излучений проявляется эффект повторного возрастания пик-фактора. В связи с этим существует актуальная научно-техническая проблема поиска оптимального метода фильтрации внеполосных излучений сигнала DRM+. Целью данной статьи является анализ существующих методов фильтрации внеполосных излучений в процессе снижения пик-фактора в системе DRM, а также выбор оптимального алгоритма фильтрации после снижения пик-фактора для передатчиков стандарта DRM+. Автор рассмотрел метод подавления внеполосных излучений с помощью цифрового фильтра на основе БПФ/ОБПФ; провел моделирование предложенного алгоритма фильтрации сигнала по маске внеполосных излучений; сравнительные исследования метода стандартного алгоритма фильтрации и предложенного алгоритма; сделал вывод о высокой эффективности последнего. Полученные результаты позволят повысить эффективность снижения пик-фактора в радиовещательных передатчиках стандарта DRM+, тем самым позволив увеличить их КПД.

*Ключевые слова* – пик-фактор, клиппинг, внеполосные излучения, фильтрация, PAPR, MER, DRM.

### Введение

В статье предпринята попытка решения актуальной научно-технической проблемы поиска оптимального метода фильтрации внеполосных излучений сигнала DRM+. Проведен анализ существующих методов фильтрации внеполосных излучений в процессе снижения пик-фактора в системе DRM, на основании которого происходит выбор оптимального алгоритма фильтрации после снижения пик-фактора для передатчиков стандарта DRM+.

После снижения пик-фактора сигнала DRM+ методами, основанными на искажении сигнала, в частности методом клиппинга или методом оконного взвешивания, значительно возрастают внеполосные составляющие в спектре сигнала. При их фильтрации проявляется нежелательный эффект повторного роста пиков сигнала, который в конечном итоге ведет к повторному росту PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) [1]. Данный эффект продемонстрирован на рис. 1.

Для борьбы с эффектом повторного роста PAPR применяют итеративные методы снижения пик-фактора, при которых процедуры клиппинга (или оконного взвешивания) и фильтрации повторяют циклически в течение нескольких итераций

вплоть до достижения требуемых уровней PAPR и внеполосных составляющих спектра сигнала. Фильтрация внеполосных составляющих, как правило, осуществляется с помощью цифрового фильтра на основе БПФ/ОБПФ.

### 1. Подавления внеполосных излучений с помощью цифрового фильтра на основе БПФ/ОБПФ

Фильтрация внеполосных излучений на основе БПФ/ОБПФ описана в [2; 3].

Структурная схема блоков клиппинга и фильтрации приведена на рис. 2.

Обработка сигнала осуществляется в основной полосе квадратурных сигналов  $I$  и  $Q$  до квадратурного модулятора. Сигнал после клиппинга с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) преобразуется из временного домена в частотный. В блоке фильтрации производится вычисление максимального превышения уровня внеполосных излучений границы спектральной маски, установленной стандартом, после чего все внеполосные составляющие подавляются на данный уровень превышения. При этом может быть введен дополнительный запас для гарантированного нахождения уровня внеполосных излучений в границах маски после прохождения сигнала по всем цепям

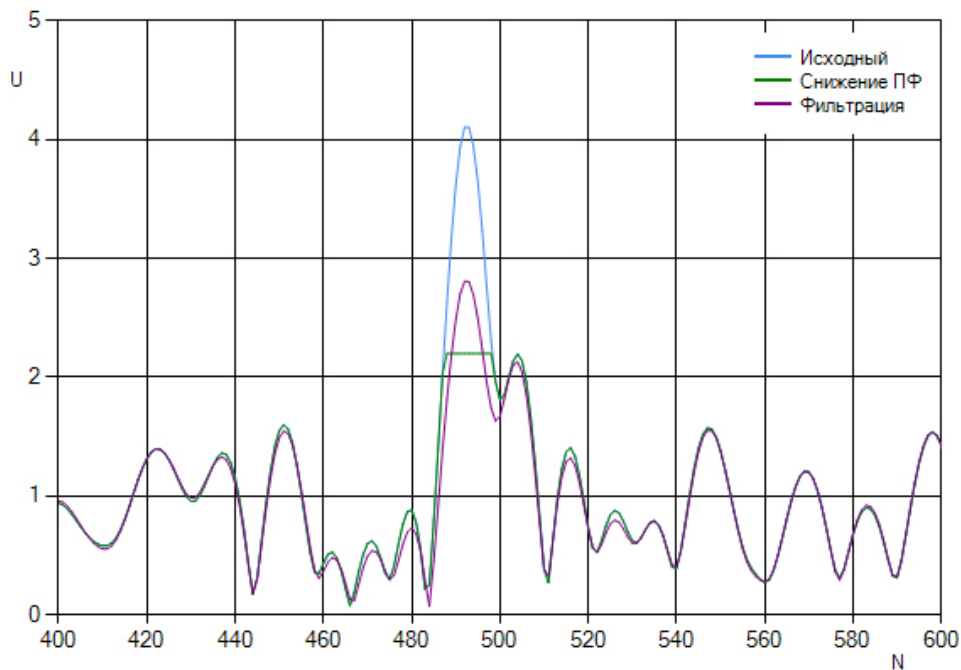


Рис. 1. Повторный рост пиков сигнала после фильтрации  
Fig. 1. Re-growth of signal peaks after filtering

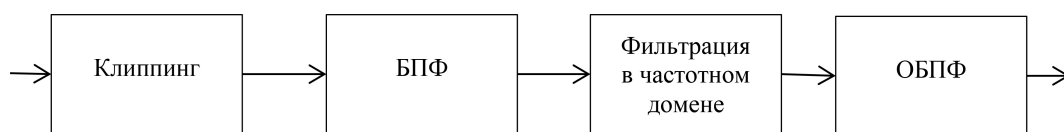


Рис. 2. Структурная схема блоков клиппинга и фильтрации  
Fig. 2. Block diagram of clipping and filtering blocks

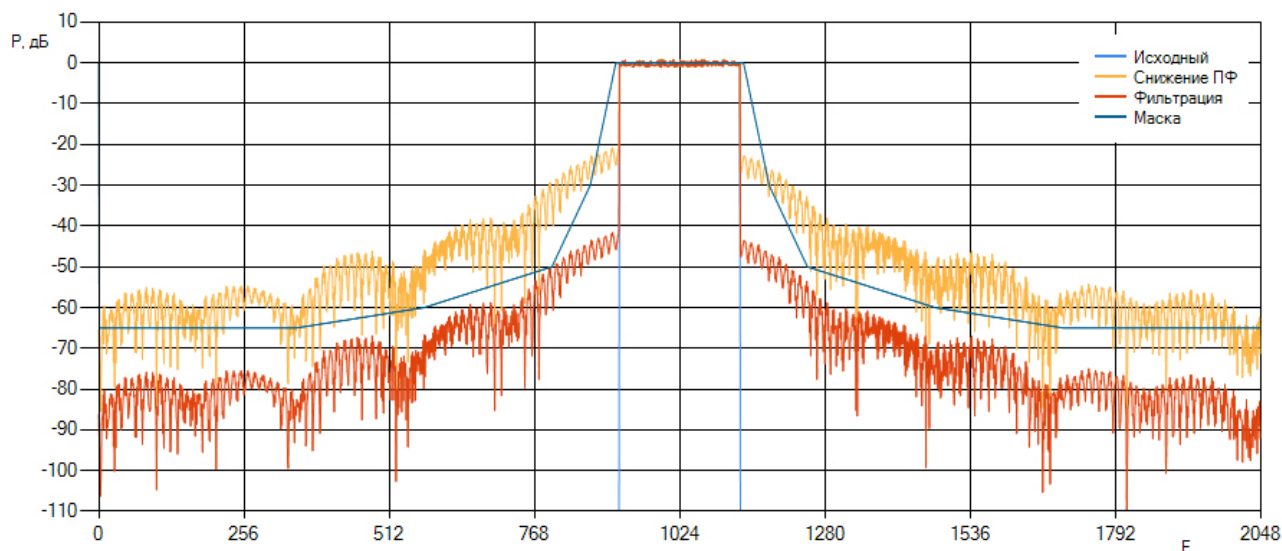


Рис. 3. Спектры исходного сигнала, сигнала после снижения пик-фактора и сигнала после фильтрации  
Fig. 3. Spectra of the original signal, the signal after the reduction of the crest factor and the signal after filtering

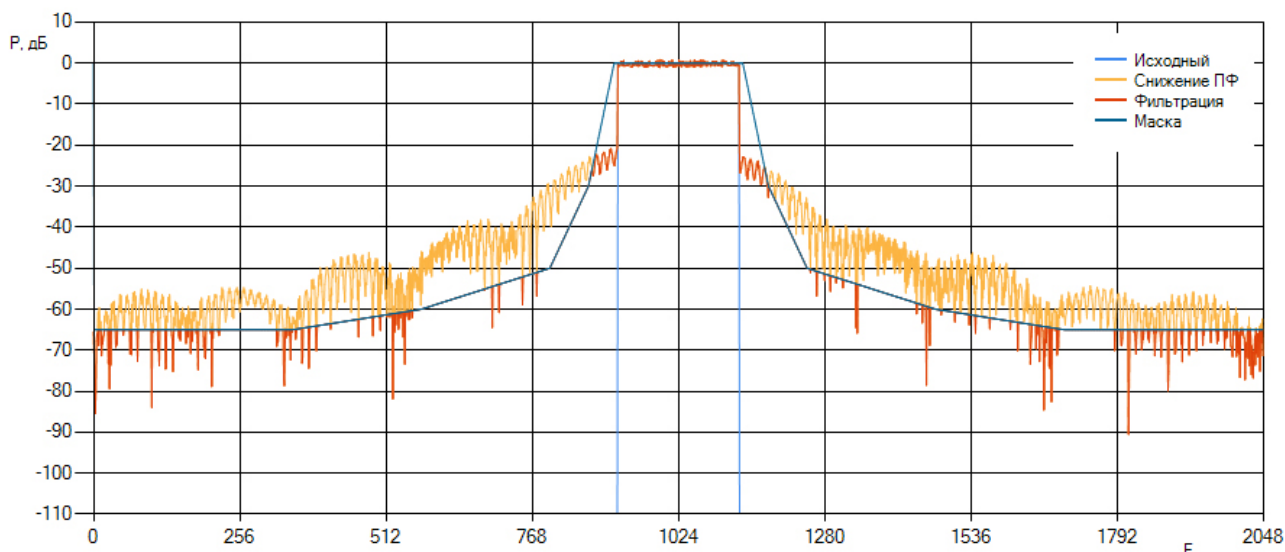


Рис. 4. Спектры исходного сигнала, сигнала после снижения пик-фактора и сигнала после фильтрации путем ограничения отсчетов по заданной маске

Fig. 4. Spectra of the original signal, the signal after reducing the crest factor and the signal after filtering by limiting the counts according to a given mask

передатчика. Составляющие спектра, относящиеся к полезной части сигнала, при этом не затрагиваются. На рис. 3 приведены спектры исходного сигнала, сигнала после снижения пик-фактора и сигнала после фильтрации.

## 2. Критерии оценки эффективности фильтрации внеполосных излучений после снижения пик-фактора

Основным критерием эффективности методов снижения пик-фактора, включающих фильтрацию внеполосных излучений, является степень подавления пик-фактора, которую обычно выражают в дБ как разность PAPR до применения метода и PAPR после применения метода. При этом основные параметры сигнала не должны выходить за границы установленных норм.

При этом при подавлении пик-фактора должны контролироваться уровень внеполосных излучений и коэффициент ошибок модуляции MER, нормы на которые установлены в «Рекомендации МСЭ-R BS.1660-8 (06/2019) Техническая основа для планирования наземного цифрового звукового радиовещания в полосе ОВЧ» и в стандарте «ETSI EN 302 245 V2.1.1 (2018-06) Transmitting equipment for the Digital Radio Mondiale (DRM) sound broadcasting service; Harmonised Standard for access to radio spectrum» соответственно. В частности, MER для передатчиков стандарта DRM+ (в полосах частот выше 30 МГц) должен быть не хуже 21 дБ.

## 3. Оптимизация фильтрации сигнала DRM+ после снижения пик-фактора

Предлагаемый в данной статье оптимизированный метод фильтрации после снижения пик-фактора основан на выборочном подавлении внеполосных составляющих. После БПФ блок фильтрации выполняет оценку соответствия заданной маске каждого отсчета внеполосных составляющих спектра сигнала. В случае если отсчет выходит за границу маски, то он ограничивается уровнем маски. Те отсчеты, которые не выходят за границу маски, не изменяются. На рис. 4 приведены спектры исходного сигнала, сигнала после снижения пик-фактора и сигнала после фильтрации методом ограничения по маске.

Далее приведены сравнительные результаты исследований снижения пик-фактора сигнала DRM+ (режим устойчивости E, 213 поднесущих) методом клиппинга и фильтрации путем подавления всех отсчетов внеполосных излучений на максимальный уровень, а также фильтрации путем ограничения отсчетов по заданной маске. Все расчеты и алгоритмы настоящих исследований реализованы на программном обеспечении CrestFactorTest собственной разработки в среде C#.

На рис. 5 показан повторный рост пиков сигнала после фильтрации путем ограничения отсчетов по заданной маске. Из данного рисунка видно, что по сравнению с рис. 1 повторный рост пиков сигнала значительно ниже, что доказывает эффективность предложенного метода фильтрации.

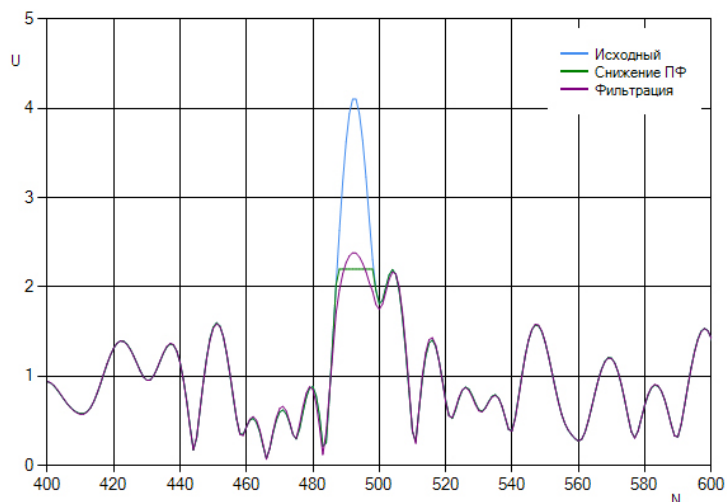


Рис. 5. Повторный рост пиков сигнала после фильтрации путем ограничения отсчетов по заданной маске  
Fig. 5. Re-growth of signal peaks after filtering by limiting the samples by a given mask

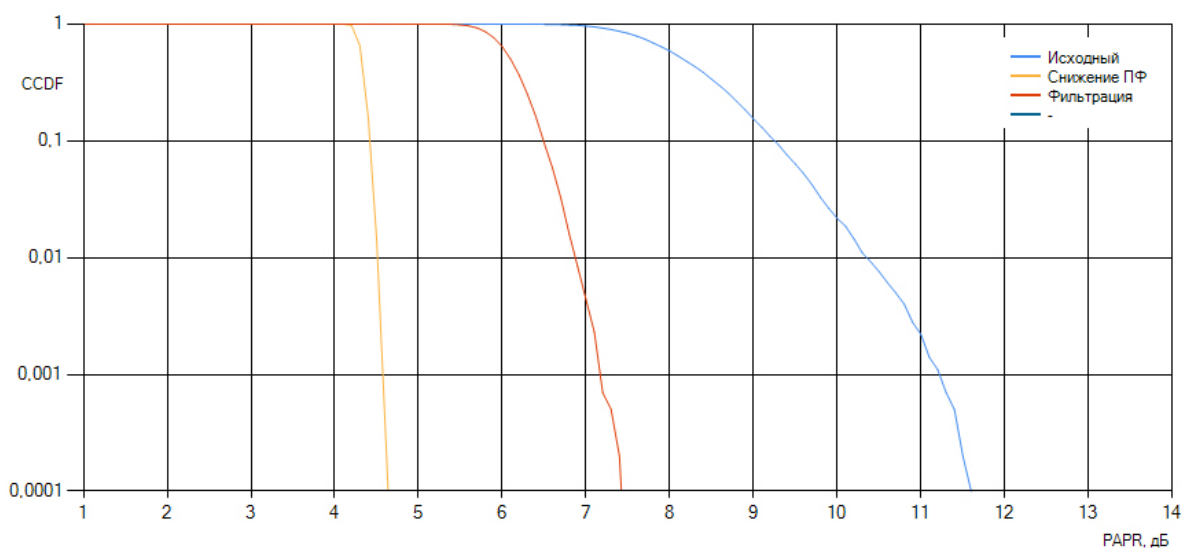


Рис. 6. CCDF пик-фактора сигнала DRM+ с модуляцией 4-QAM, стандартная фильтрация  
Fig. 6. CCDF of DRM+ signal with 4-QAM modulation, standard filtering

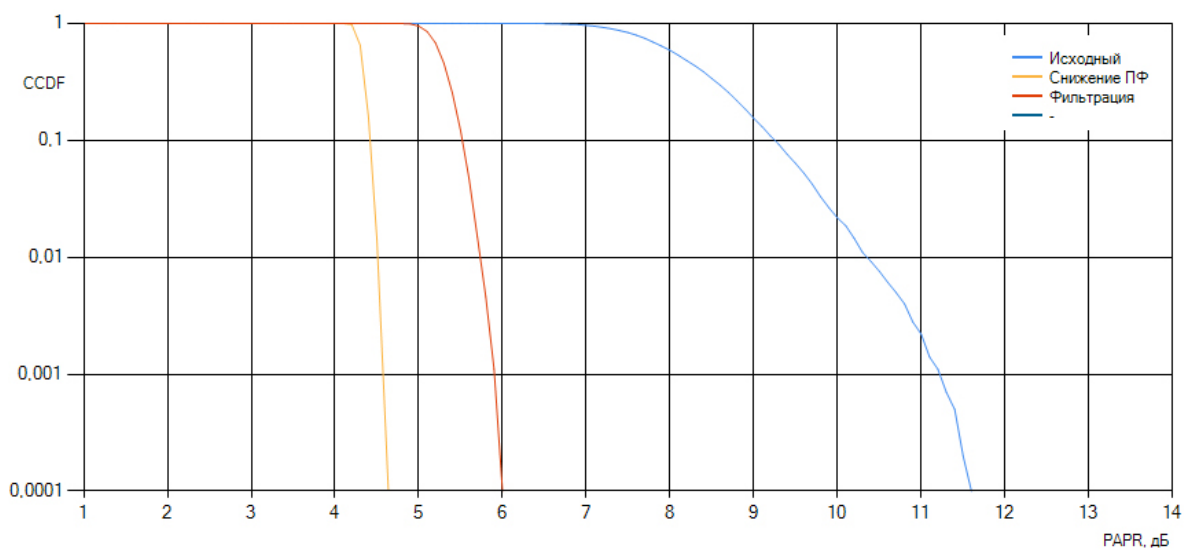


Рис. 7. CCDF пик-фактора сигнала DRM+ с модуляцией 4-QAM, фильтрация по маске  
Fig. 7. CCDF of DRM+ signal with 4-QAM modulation, mask filtering

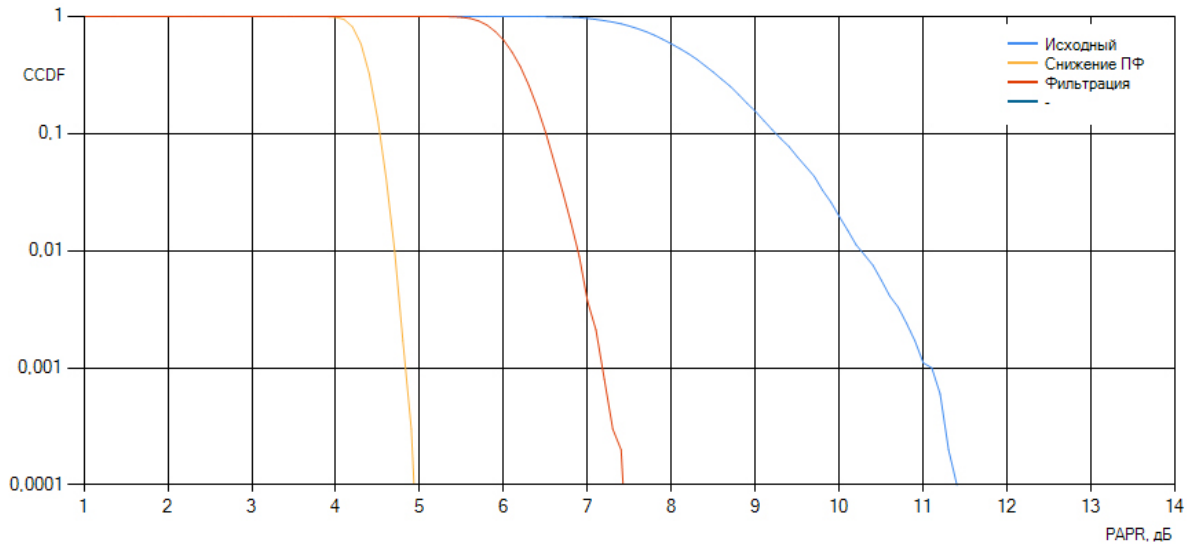


Рис. 8. CCDF пик-фактора сигнала DRM+ с модуляцией 16-QAM, стандартная фильтрация  
Fig. 8. CCDF of DRM+ signal crest factor with 16-QAM modulation, standard filtering

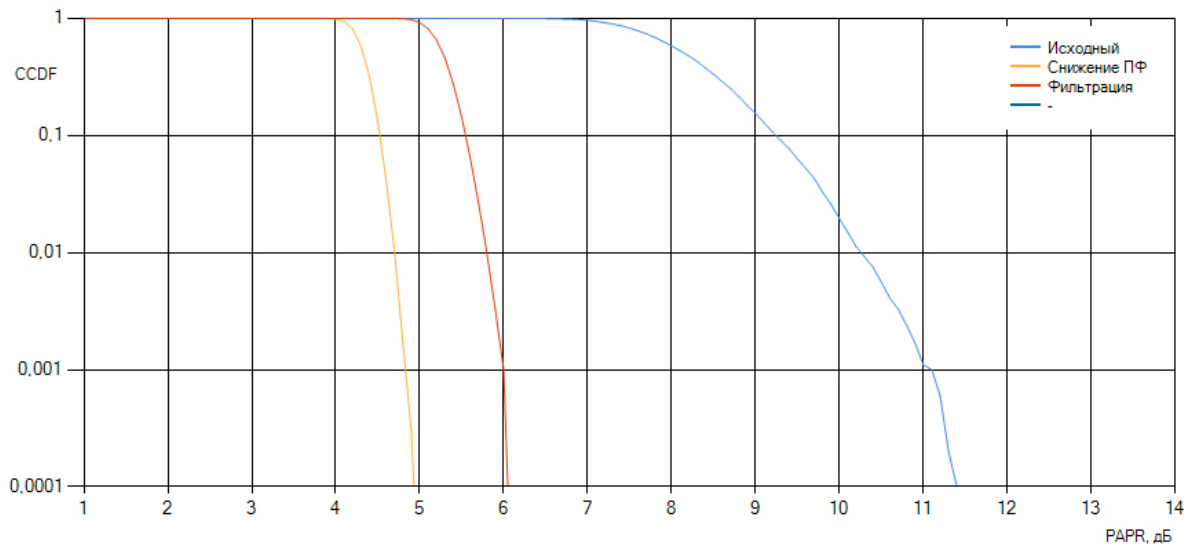


Рис. 9. CCDF пик-фактора сигнала DRM+ с модуляцией 16-QAM, фильтрация по маске  
Fig. 9. CCDF crest factor of DRM+ signal with 16-QAM modulation, mask filtering

На рис. 6–9 приведены графики комплементарной интегральной функции распределения CCDF пик-фактора для сигналов DRM+ модуляцией 4-QAM и 16-QAM после клиппинга и фильтраций с помощью стандартной и предложенной методик. Для анализа использовалось 10 000 символов OFDM. Размерность БПФ/ОБПФ – 2048. Коэффициент клиппинга  $CR$ , определяемый выражением (1), был равен 1,6.

$$CR = \frac{A}{x_{скз}}, \quad (1)$$

где  $A$  – уровень клиппинга;  $x_{скз}$  – среднеквадратичное значение амплитуды комплексного OFDM-сигнала в основной полосе. MER при этом находился на уровне 23,2 дБ.

На рис. 10–13 приведены графики зависимости MER от пик-фактора PAPR для сигналов DRM+ модуляцией 4-QAM и 16-QAM после клиппинга и фильтраций с помощью стандартной и предложенной методик.

Результаты анализа графиков с рис. 6–9 сведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что предложенный метод фильтрации по маске сигнала DRM+ после клиппинга при уровнях MER в районе 23,2 дБ обеспечивает повторное возрастание пик-фактора на 1,45 дБ меньше при модуляции 4-QAM и на 1,3 дБ меньше при модуляции 16-QAM по сравнению со стандартным методом фильтрации.

Результаты анализа графиков с рис. 10–13 сведены в табл. 2.

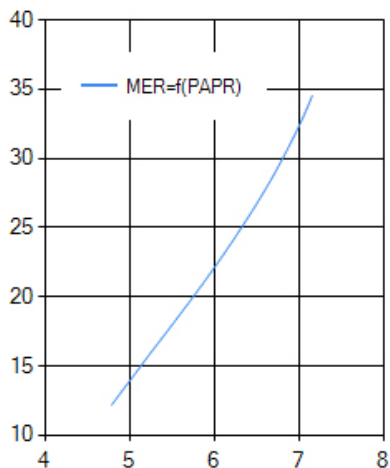


Рис. 10. Зависимость MER от PAPR-сигнала DRM+ с модуляцией 4-QAM, стандартная фильтрация  
 Fig. 10. MER versus PAPR of DRM+ signal with 4-QAM modulation, standard filtering

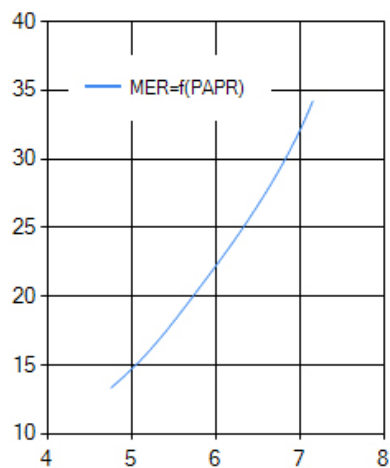


Рис. 12. Зависимость MER от PAPR-сигнала DRM+ с модуляцией 16-QAM, стандартная фильтрация  
 Fig. 12. MER versus PAPR of DRM+ signal with 16-QAM modulation, standard filtering

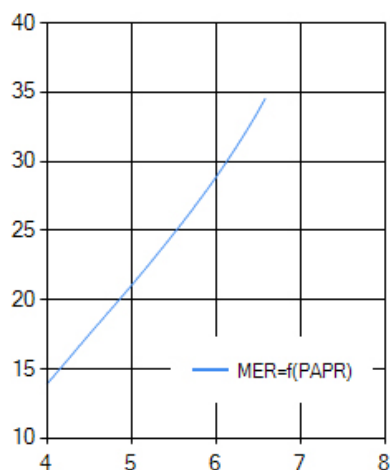


Рис. 11. Зависимость MER от PAPR-сигнала DRM+ с модуляцией 4-QAM, фильтрация по маске  
 Fig. 11. MER versus PAPR of DRM+ signal with 4-QAM modulation, filtering by mask

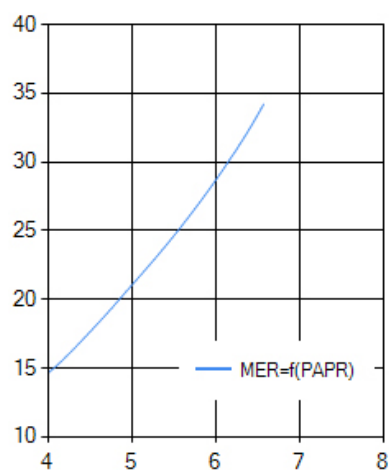


Рис. 13. Зависимость MER от PAPR-сигнала DRM+ с модуляцией 16-QAM, фильтрация по маске  
 Fig. 13. Dependence of MER on PAPR of DRM+ signal with 16-QAM modulation, filtering by mask

Табл. 1  
 Table 1

	Пик-фактор до фильтрации PAPR1, дБ	Пик-фактор после фильтрации PAPR2, дБ	PAPR2–PAPR1, дБ
Стандартная фильтрация: – 4-QAM – 16-QAM	4,73 5,04	7,67 7,74	2,94 2,70
Фильтрация по маске: – 4-QAM – 16-QAM	4,73 5,04	6,18 6,34	1,45 1,30

Табл. 2  
 Table 2

Режим	PAPR, дБ, при MER = 21 дБ
Стандартная фильтрация: – 4-QAM – 16-QAM	5,90 5,92
Фильтрация по маске: – 4-QAM – 16-QAM	5,00 5,01

Из табл. 2 видно: при MER, равном 21 дБ, что соответствует граничному требованию ETSI EN 302 245, предложенный метод фильтрации обеспечивает выигрыш PAPR на 0,9 дБ по сравнению со стандартным методом фильтрации.

### Заключение

Предложен оптимизированный метод фильтрации сигнала DRM+ после снижения пик-фактора на основе переноса сигнала из временного домена в частотный с помощью БПФ, выборочного ограничения внеполосных составляющих спектра сигнала по установленной маске и обратного

переноса полученного сигнала из частотного домена во временной с помощью ОБПФ. Сравнение стандартного метода фильтрации, основанного на ограничении всех внеполосных составляющих спектра на общий заданный уровень с предложенным методом, показало достаточно высокую эффективность последнего, что позволяет рекомендовать его к применению в современных передатчиках стандарта DRM+.

Полученные результаты позволяют повысить эффективность снижения пик-фактора в радиовещательных передатчиках стандарта DRM+, тем самым позволив увеличить их КПД.

### Список литературы

1. Бузов А.Л., Морозов К.Ю. Методы снижения пик-фактора в радиовещательных передатчиках стандарта DRM // Радиотехника. 2019. № 6 (7). С. 24–29.
2. Mowla M., Ali Y., Aoni R.A. Performance comparison of two clipping based filtering methods for PAPR reduction in OFDM signal // International Journal of Mobile Network Communications & Telematics. 2014. Vol. 4, No. 1. P. 23–34. URL: <https://wireilla.com/papers/ijmnc/V4N1/4114ijmnc03.pdf>.
3. Power Savings Analysis of Clipping and Filtering Method in OFDM Systems / A.K. Gurung [et al.] // 2008 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference. 2008. P. 204–208. DOI: <https://doi.org/10.1109/ATNAC.2008.4783323>.

### References

1. Buzov A.L., Morozov K.Yu. Crest Factor Reduction Techniques in DRM Broadcast Transmitters. *Radiotekhnika*, 2019, no. 6 (7), pp. 24–29. (In Russ.)
2. Mowla M., Ali Y., Aoni R.A. Performance comparison of two clipping based filtering methods for PAPR reduction in OFDM signal. *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 23–34. URL: <https://wireilla.com/papers/ijmnc/V4N1/4114ijmnc03.pdf>.
3. Gurung A.K. et al. Power Savings Analysis of Clipping and Filtering Method in OFDM Systems. *2008 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference*, 2008, pp. 204–208. DOI: <https://doi.org/10.1109/ATNAC.2008.4783323>.

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2020, vol. 23, no. 3, pp. 82–89

DOI 10.18469/1810-3189.2020.23.3.82-89

Received 5 August 2020  
Accepted 31 August 2020

### Modified DRM+ signal generation algorithm with reduced crest factor

*Konstantin Yu. Morozov*

JSC «Samara Innovative Business Radio Systems»  
26, Kirova Avenue,  
Samara, 443022, Russia

**Abstract** – To reduce the crest factor in the DRM+ system due to the limitations imposed by the standard the peak limiting method (clipping) and the window weighting method, which are based on signal distortion, are widely used. As a result of the application of these methods out-of-band emissions in the signal spectrum significantly increase. After filtering out-of-band emissions the effect of a repeated increase in the crest factor appears. In this regard, there is an urgent scientific and technical problem of finding the optimal method for filtering out-of-band emissions of the DRM+ signal. The purpose of this article is to analyze the existing methods for filtering out-of-band emissions in the process of reducing the crest factor in a DRM system, as well as choosing the optimal filtering algorithm after reducing the crest factor for DRM+ transmitters. A method for suppressing out-of-band emissions using a digital filter based on FFT / IFFT is considered. The modeling of the proposed algorithm for filtering the signal by the mask of out-of-band emissions is carried out. Comparative studies of the method of the standard filtering algorithm and the proposed algorithm are carried out; the high efficiency of the latter is shown. The results obtained will improve the efficiency of reducing the crest factor in broadcasting transmitters of the DRM + standard, thereby increasing their power efficiency.

**Keywords** – crest factor, clipping, out of band emissions, filtering, PAPR, MER, DRM.

## Информация об авторе

Морозов Константин Юрьевич, начальник научного отдела АО «Самарское инновационное предприятие радиосистем».

Область научных интересов: радиотехника, сети связи, цифровая обработка сигналов.

E-mail: mky@siprs.ru

## Information about the Author

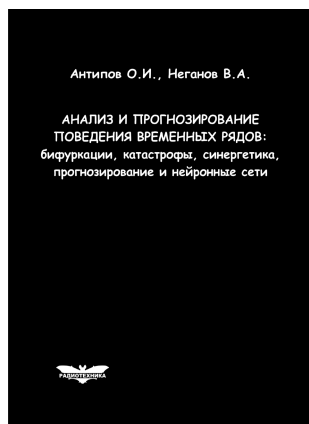
Konstantin Yu. Morozov, head of the scientific department of JSC «Samara Innovative Business Radio Systems».

Research interests: radio engineering, communication networks, digital signal processing.

E-mail: mky@siprs.ru

Антипов, О.И.

**Анализ и прогнозирование поведения временных рядов: бифуркации, катастрофы, синергетика, фракталы и нейронные сети** / О.И. Антипов, В.А. Неганов. – М.: Радиотехника, 2011. – 350 с.



ISBN 978-5-88070-294-7

УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96

Монография посвящена объединению нескольких направлений в науке: бифуркаций в нелинейных динамических (или детерминированных) системах, причем внимание уделяется бифуркациям-кризисам, которые отождествляются с катастрофами в синергетике – науке о самоорганизации в сложных системах, где велика роль коллективных, кооперативных эффектов, возникновения порядка – фрактальных структур в турбулентности (или хаосе). В синергетике общим является принцип подчинения, который позволяет исключать большое число переменных в сложных системах и описывать в них сложные процессы. Использование в роли одной из основных количественных характеристик катастроф фрактального показателя Херста связывает фракталы с бифуркациями. Объединение этих четырех направлений позволяет упростить проектирование прогнозирующих нейронных сетей, которое в настоящее время отчасти является искусством.

Даны авторские модификации некоторых известных фрактальных методов, позволяющие проводить более глубокий анализ хаотических процессов. Эти результаты, на наш взгляд, должны являться необходимой частью полного алгоритма построения прогностических моделей, описанного в книге. В частности, описан авторский алгоритм определения временного лага, необходимого для реконструкции аттрактора динамической системы, и модификация метода ближайших ложных соседей, которую можно использовать в качестве индикатора приближающейся катастрофы.

Приведены конкретные примеры из таких областей науки, как радиотехника, экономика и медицина.

Монография представляет интерес для научных работников, аспирантов и докторантов, работающих в области прикладных задач анализа, моделирования и прогнозирования хаотических процессов в нелинейных системах из различных отраслей науки и техники.