

9. Besspalov A.N. et al. Microstrip antennas based on biisotropic and bianisotropic chiral metamaterials in MIMO systems. *Radiotekhnika*, 2019, no. 3, pp. 5–11. (In Russ.)
10. Klyuev D.S. et al. Microstrip and fractal antennas based on chiral metamaterials in MIMO systems. *12th Chaotic Modeling and Simulation International Conference, Springer Proceedings in Complexity*, 2020, pp. 295–306.

Received 11.01.2021

УДК 621.376.6

АЛГОРИТМ СНИЖЕНИЯ ПИК-ФАКТОРА СИГНАЛОВ РАДИОВЕЩАНИЯ СТАНДАРТА DRM МЕТОДОМ ОКОННОГО ВЗВЕШИВАНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И АДАПТИВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ДЛИНЫ ОКНА

Минкин М.А., Морозов К.Ю.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: mky@siprs.ru

Проблема высокого пик-фактора в системах с OFDM-модуляцией, к которым относится система цифрового радиовещания стандарта DRM, вызывает необходимость поиска эффективных методов его снижения. Среди возможных к применению в системе DRM методов снижения пик-фактора выделяется метод на основе оконного взвешивания с обратной связью. Несмотря на то что он является достаточно эффективным, для него, как и прочих методов, характерен эффект повторного роста пик-фактора после фильтрации внеполосных излучений. Для дальнейшей оптимизации данного метода проведены исследования параметров сигнала DRM на предмет корреляции с величиной повторного роста пик-фактора. На основе полученных данных разработан адаптивный алгоритм оконного взвешивания с обратной связью и применением изменяемой длины окна. Выполнен анализ предложенного алгоритма с помощью программы собственной разработки CrestFactorTest. Проведены экспериментальные исследования стандартного алгоритма снижения пик-фактора на основе оконного взвешивания с обратной связью и предложенного адаптивного алгоритма, показавшие эффективность последнего.

Ключевые слова: анализ сигнала, OFDM-символ, радиовещание, модулятор, цифровой фильтр, внеполосные излучения, MER

Введение

Наличие проблемы высокого пик-фактора в модуляторах стандарта DRM (Digital Radio Mondiale) [1; 2], как и в других системах с OFDM-модуляцией (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов), вызывает необходимость поисков эффективных методов его подавления. Поскольку в системах с OFDM-модуляцией применяется большое число поднесущих частот, формируемых посредством обратного быстрого преобразования Фурье (БПФ), сложение их амплитуд приводит к образованию мощных пиков сигнала. Следствием являются сильные нелинейные искажения в радиочастотных узлах передающего оборудования. Поскольку для передачи сигнала без искажений в передатчиках применяют усилители мощности с высокой линейностью, а выход высокочастотного сигнала за границы линейной зоны усилителя приводит к искажению сигнала, происходят рост ошибок модуляции (снижение MER – Modulation Error Ratio) и появление сильных внеполосных

излучений. Если не принимать мер к снижению пик-фактора, невозможно будет обеспечить высокий коэффициент полезного действия передатчика, что приведет к его значительному удорожанию.

Однако не все методы снижения пик-фактора применимы к стандарту DRM [3]. В общем случае метод должен соответствовать следующим критериям:

1. Не нарушать требования стандарта DRM и не предполагать модификаций структуры приемника, скорости передачи данных, применения дополнительных пилотных поднесущих.
2. Не подавлять MER ниже 21 дБ в системе DRM+ и ниже 30 дБ в системе DRM30 [4].
3. Не вызывать рост внеполосных излучений выше маски спектра, установленной в [5; 6].
4. Не ухудшать эффективность синхронизации приемника сигнала DRM.

Проверка методов снижения пик-фактора на соответствие данным критериям оставляет лишь несколько из них, которые могут быть использованы в оборудовании стандарта DRM [7]. К ним относятся методы на основе клиппинга, включающие методы оконного взвешивания, а также ме-

тод на основе активного расширения сигнального созвездия.

Проведенные сравнительные исследования методов показали, что алгоритм оконного взвешивания с обратной связью (ОВОС) [8] дает хорошие результаты в задачах снижения пик-фактора сигналов OFDM. Относительно небольшой рост внеполосных излучений сигнала после применения данного метода может быть успешно подавлен путем применения последующей фильтрации сигнала. Отрицательным эффектом фильтрации является повторное возрастание ранее подавленных пиков сигнала. Следует отметить, что данный эффект свойственен всем методам, но для метода ОВОС он имеет наименьшую величину.

Таким образом, для дальнейшего повышения эффективности метода снижения пик-фактора на основе алгоритма ОВОС необходимо искать пути оптимального выбора параметров алгоритма.

Постановка задачи

Для оптимального выбора параметров алгоритма ОВОС необходимо определить влияние этих параметров как на степень снижения пик-фактора, так и на прочие параметры сигнала DRM, такие как MER и уровень внеполосных излучений. Также необходимо исследовать параметры исходного сигнала, доступные для быстрого анализа, на предмет корреляции с величиной роста пик-фактора после фильтрации.

На основе полученных результатов требуется разработать алгоритм адаптивного выбора параметров метода ОВОС. Для подтверждения эффективности полученного адаптивного алгоритма для него и стандартного алгоритма ОВОС должны быть проведены сравнительные исследования методом моделирования и путем проведения эксперимента в условиях, приближенных к реальным.

Решение задачи

При внимательном изучении сигнала DRM после снижения пик-фактора методом ОВОС и фильтрации можно заметить, что у некоторых OFDM-символов наблюдается повышенное повторное возрастание пик-фактора. Небольшое увеличение длины окна устраняет этот эффект. На рисунке 1 показан пример роста пика сигнала DRM+ с модуляцией 16-QAM после фильтрации методом оконного взвешивания окном Гаусса с обратной связью для случаев с различной длиной окна (при длительности полезной части OFDM-символа 2048 отсчетов).

В первом случае при длине окна 21 отсчет пик-фактор сигнала составляет 4,98 дБ. Увеличе-

ние длины окна до 27 отсчетов позволяет снизить пик-фактор до 4,73 дБ (то есть на 0,25 дБ), при этом MER падает примерно на 0,6 дБ.

Для сохранения MER в установленных стандартом границах такое увеличение длины окна должно применяться выборочно к проблемным OFDM-символам. В частности, исследования показывают, что для сигнала DRM+ 16-QAM повторный рост пик-фактора символов OFDM достигает 0,45 дБ. Для уменьшения возрастания пик-фактора у таких символов до 0,2 дБ достаточно увеличить длину окна до 27 отсчетов. Ухудшение MER при этом не превышает 0,6 дБ. Для символов OFDM с меньшим повторным ростом пик-фактора длина окна может быть сокращена по приблизительно линейной зависимости от роста. Деградация MER при этом также уменьшается.

В ходе исследований было установлено, что для сигнала DRM+ 16-QAM число символов OFDM, у которых происходит рост пик-фактора в пределах свыше 0,1 дБ, не превышает 30 %. Таким образом, если в результате обработки сигнала для 30 % символов MER снизится на 0,6 дБ относительно исходных 21,5 дБ, средний MER упадет до 21,05 дБ, что укладывается в действующие нормы [4].

Для изучения корреляции между ростом пик-фактора после фильтрации и параметрами сигнала были проведены исследования для следующих параметров, которые можно быстро вычислить, не прибегая к ресурсоемким расчетам:

- пик-фактор исходного сигнала;
- максимальная энергия пика сигнала выше порога ограничения A ;
- максимальная длительность пика по уровню порога ограничения A ;
- максимальная скорость изменения сигнала на уровне порога ограничения A ;
- отношение максимальной амплитуды пика выше порога ограничения A к длительности пика по уровню порога ограничения.

Наибольшая корреляция возрастания пик-фактора после фильтрации наблюдается с отношением максимальной амплитуды пика выше порога ограничения A к длительности пика по уровню порога ограничения. Вычисление указанной величины выполнялось согласно выражениям (1)–(2) в соответствии с рисунком 2:

$$X_i = \frac{U_{\max i} - A \text{ NFFT}}{n_{\text{лп}} - n_{0i}} \cdot U, \quad (1)$$

$$X = \max_{0 \leq i \leq N-1} [X_i], \quad (2)$$

где X_i – отношение максимальной амплитуды i -го пика выше абсолютного порога ограничения A

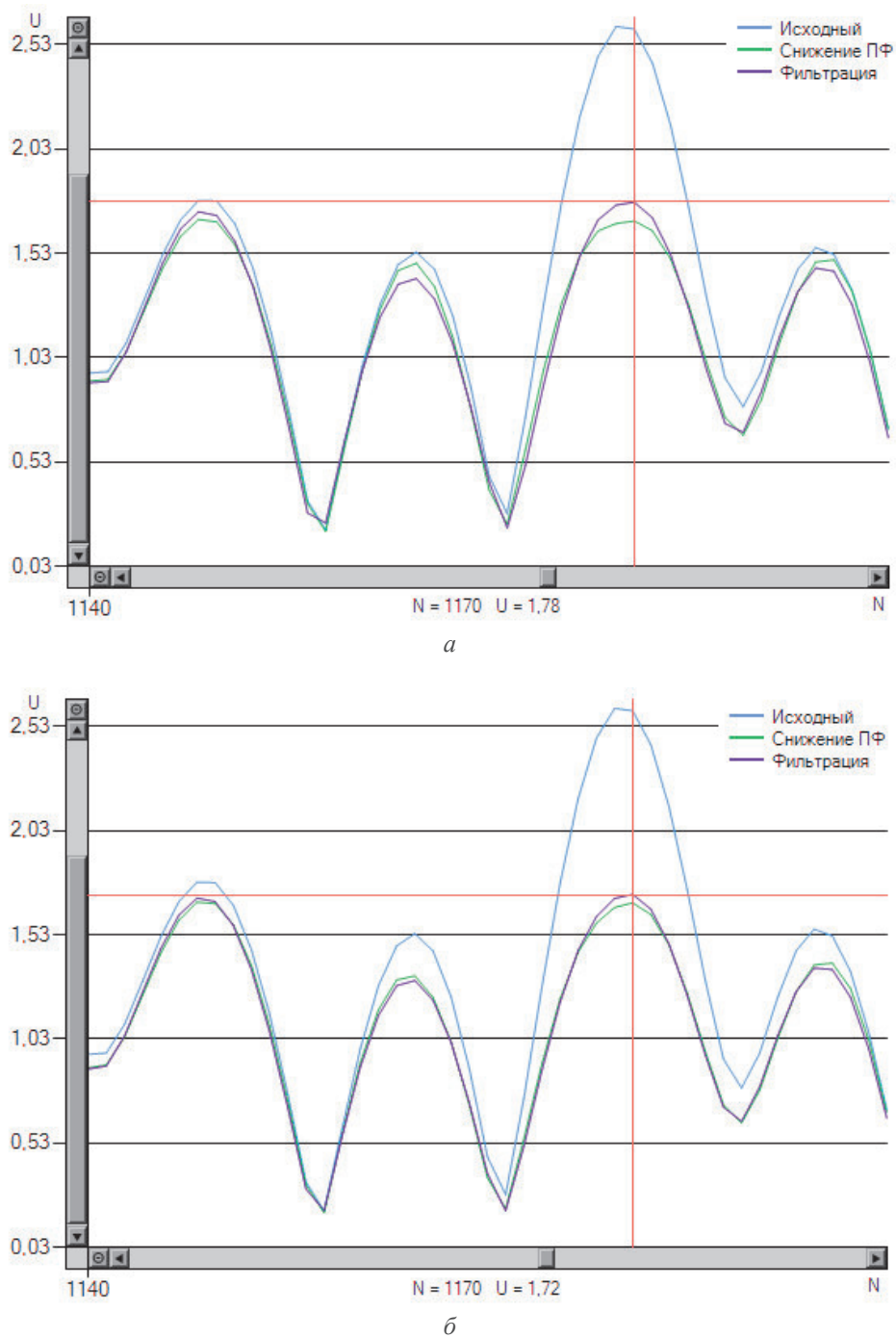


Рисунок 1. Рост пика сигнала DRM+ 16-QAM после фильтрации для случаев оконного взвешивания окном Гаусса с обратной связью с длиной окна 21 отсчет (а) и 27 отсчетов (б)

к длительности пика по уровню порога ограничения; $U_{\max i}$ – максимальная амплитуда i -го пика; n_{oi} – начальный отсчет границы i -го импульса по уровню порога A ; n_{li} – конечный отсчет границы i -го импульса по уровню A ; $NFFT$ – размерность БПФ; U_{cp} – среднее значение напряжения сигнала; X – максимальное значение параметра X_i среди всех N пиков символа OFDM, превышающих порог A .

Для исследуемого сигнала DRM+ 16-QAM линейный коэффициент корреляции Пирсона

составил 0,55. Сила связи по шкале Чеддока интерпретируется как заметная, поэтому указанный параметр может быть использован для оценки оптимальной длины окна. Распределение роста пик-фактора в зависимости от отношения максимальной амплитуды пика выше порога ограничения A к длительности пика по уровню порога ограничения для сигнала DRM+ 16-QAM показано на рисунке 3.

Применив линейную аппроксимацию, можно с достаточно высокой долей достоверности полу-

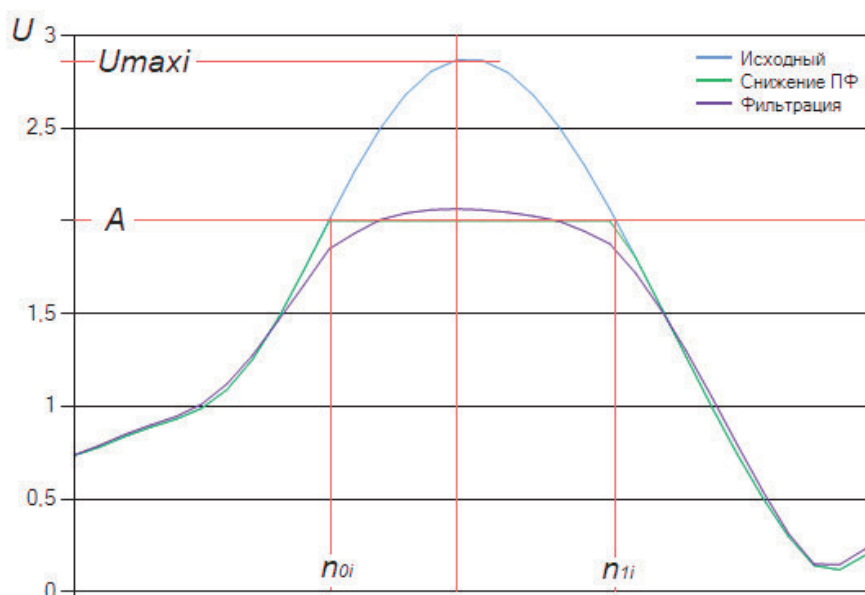


Рисунок 2. Амплитуда пика и длительность пика по уровню порога ограничения A

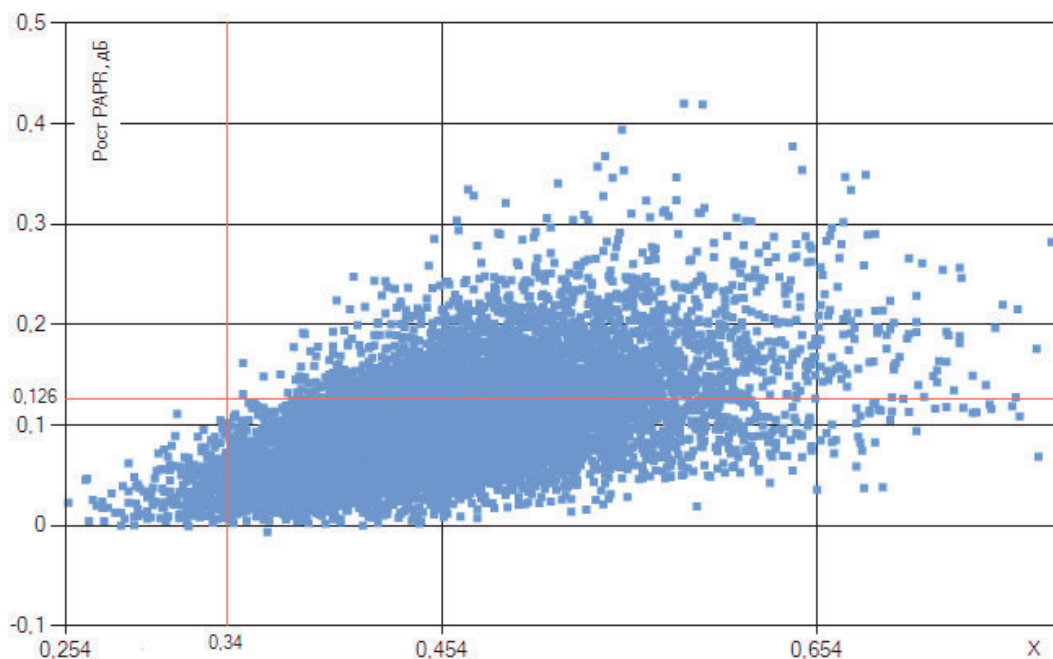


Рисунок 3. Распределение роста пик-фактора в зависимости от отношения максимальной амплитуды пика выше порога ограничения A к длительности пика по уровню порога ограничения для сигнала DRM+ 16-QAM

чить зависимость возрастания пик-фактора после фильтрации к отношению максимальной амплитуды пика выше порога A к длительности пика по уровню порога ограничения и на основе данной зависимости разработать адаптивный алгоритм.

Принцип предлагаемого алгоритма заключается в следующем. Для каждого OFDM-символа сигнала DRM рассчитывается отношение максимальной амплитуды пика выше порога ограничения A к длительности пика по уровню порога ограничения. Длина окна вычисляется пропорционально полученному значению данного параметра.

Чтобы исключить влияние слишком малых или слишком больших случайных отклонений параметра, длина окна ограничивается по максимуму и минимуму. В результате длина окна рассчитывается по выражению

$$W = \begin{cases} W_{\min}, & X \leq X_{\min}; \\ \frac{W_{\max} - W_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} (X - X_{\min}) + W_{\min}, & X_{\min} < X \leq X_{\max}; \\ W_{\max}, & X > X_{\max}, \end{cases} \quad (3)$$

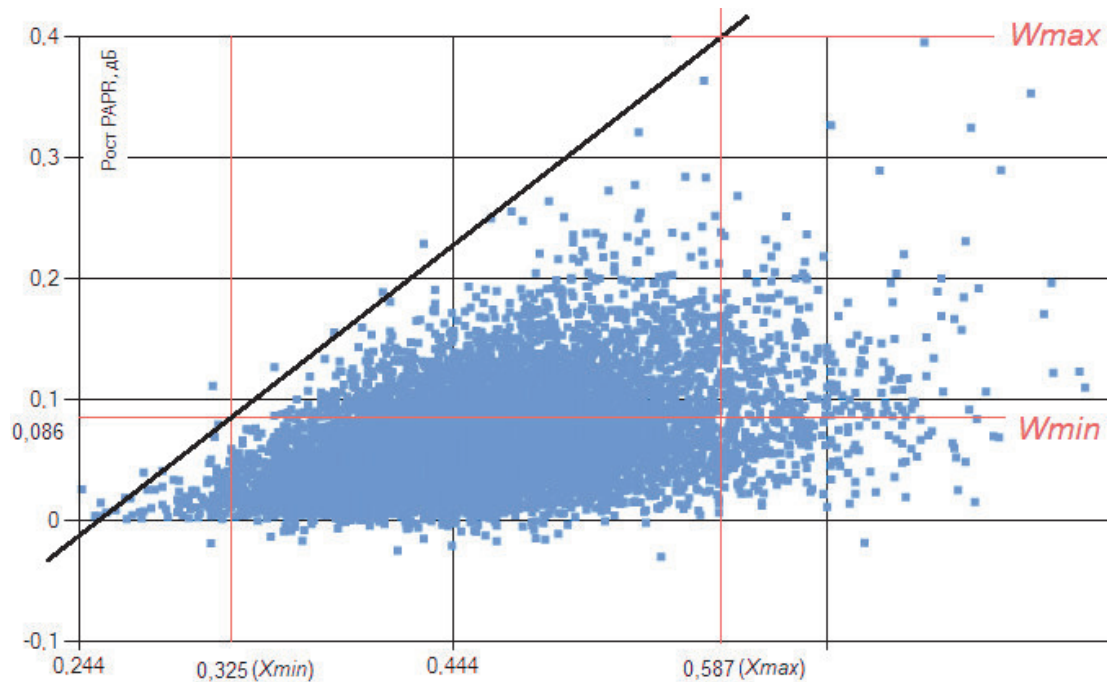


Рисунок 4. Граничные величины параметров алгоритма

где W – расчетная длина окна; X_{\min} – величина минимального отношения максимальной амплитуды пика выше порога ограничения A к длительности пика по уровню порога ограничения; X_{\max} – величина максимального отношения максимальной амплитуды пика выше порога ограничения A к длительности пика по уровню порога ограничения; W_{\min} – минимальная длина окна; W_{\max} – максимальная длина окна;

Величина X_{\min} алгоритма выбирается по точке пересечения прямой, аппроксимированной вдоль верхней границы распределения пик-фактора, с уровнем величины роста пик-фактора, для которой доля символов OFDM с ростом пик-фактора более указанной величины не превышает 30 %. Величина X_{\max} выбирается по точке пересечения прямой, аппроксимированной вдоль верхней границы распределения пик-фактора, с уровнем максимального роста пик-фактора. Выбор параметров показан на рисунке 4.

Приведенные параметры алгоритма определяются однократно для каждого вида сигнала на этапе разработки оборудования, в котором данный алгоритм должен быть реализован. В частности, для сигнала DRM+ 16-QAM были получены следующие значения параметров: $W_{\min} = 21$; $W_{\max} = 27$; $X_{\min} = 0,340$; $X_{\max} = 0,593$.

Длины окон приведены для размерности БПФ (эквивалентной числу отсчетов полезной части OFDM-символа), равной 2048. Для других значений размерностей БПФ длины окон должны быть пересчитаны согласно выражению (4):

$$W_{\text{new}} = W_{\text{old}} \frac{NFFT_{\text{new}}}{2048}, \quad (4)$$

где W_{new} – новая длина окна; W_{old} – длина окна для размерности БПФ равна 2048; $NFFT_{\text{new}}$ – новая размерность БПФ.

Для быстрого вычисления новых значений коэффициентов окна следует использовать табличный метод. Для этого сначала рассчитывают исходный массив коэффициентов окна WIN_{base} с достаточно большой длиной W_{base} (например, 4096 и более). Коэффициенты нового окна $WIN_{\text{new}}(i)$, $i = 0, \dots, W_{\text{new}} - 1$, длина W_{new} которого много меньше длины исходного окна W_{base} , могут быть с достаточно высокой точностью получены из выражения (5):

$$WIN_{\text{new}}(i) = WIN_{\text{base}}\left(\text{round}\left(\frac{W_{\text{base}}}{W_{\text{new}}}i\right)\right), \quad (5)$$

где $\text{round}()$ – операция округления до целого. Полученный новый массив коэффициентов окна $WIN_{\text{new}}[W_{\text{new}}]$ используют в методе ОВОС, применяемом к текущему символу OFDM. Обработанный символ OFDM подвергается оптимальной фильтрации на основе метода, описанного в [9].

Результаты моделирования

Все алгоритмы и вычисления данных исследований реализованы с использованием предложенной модели на программном обеспечении CrestFactorTest.

На рисунке 5 приведены графики комбинированной интегральной функции распределения

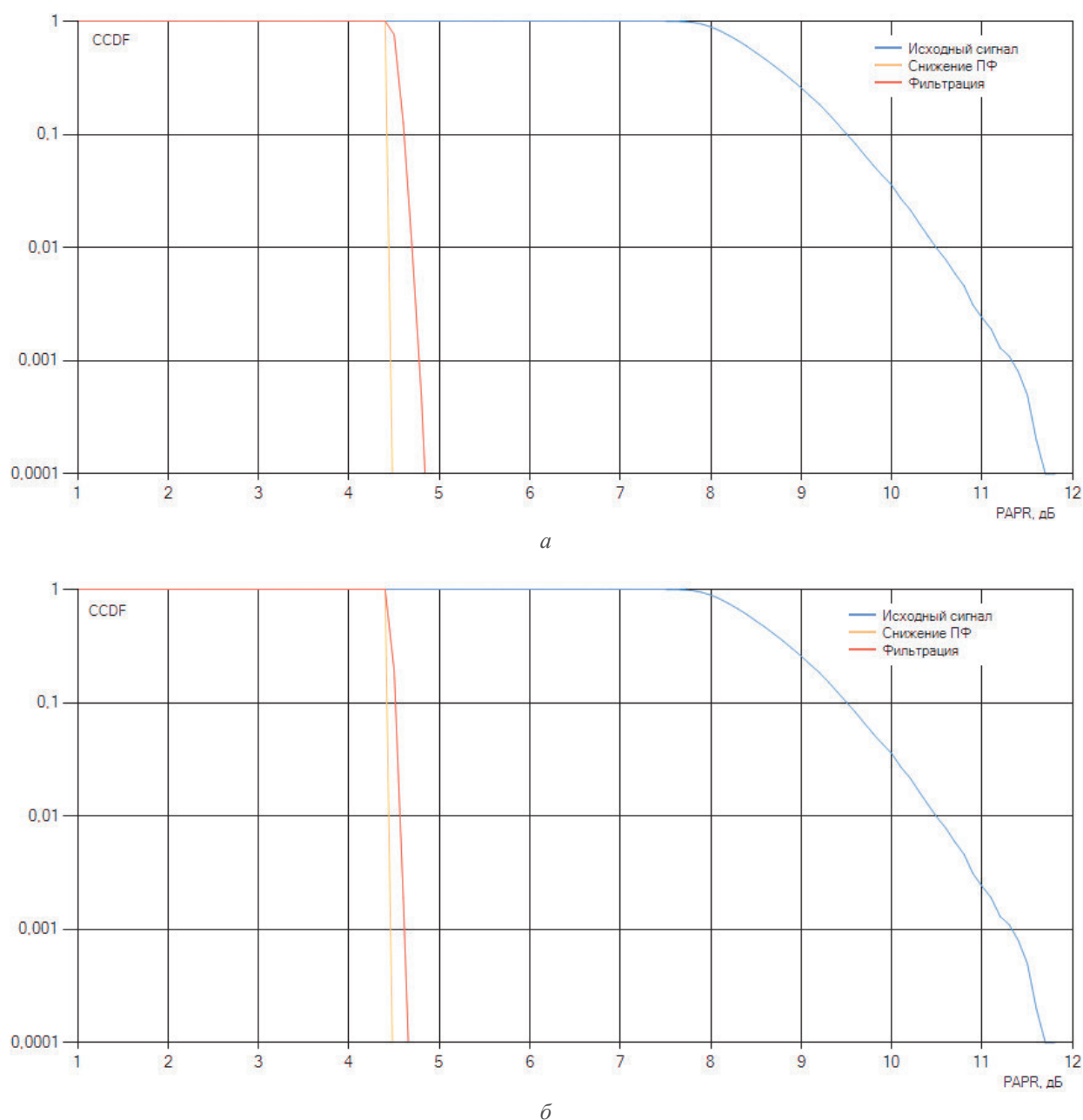


Рисунок 5. График комплементарной интегральной функции распределения (CCDF) пик-фактора для сигнала DRM+ 16-QAM при стандартном оконном взвешивании окном Гаусса с обратной связью (а) и при оконном взвешивании окном Гаусса с обратной связью с адаптивно изменяемой длиной окна (б)

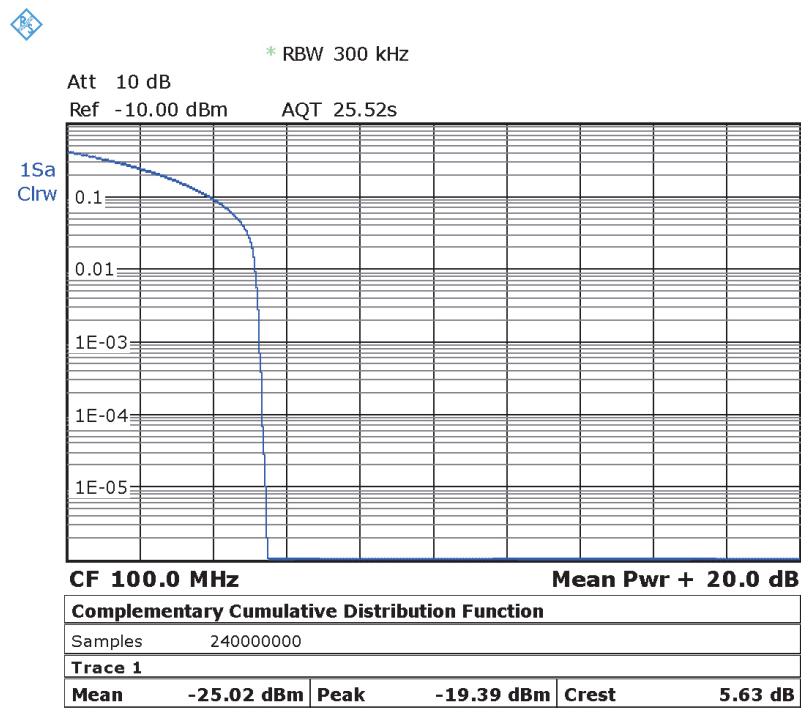
(CCDF) пик-фактора для сигнала DRM+ 16-QAM при стандартном оконном взвешивании окном Гаусса с обратной связью и при оконном взвешивании окном Гаусса с обратной связью с адаптивно изменяемой длиной окна. Для обоих случаев в ходе исследований осуществлялся контроль уровня внеполосных излучений и MER, показавший, что их значения не выходят за установленные требования [4–6].

Пик-фактор сигнала, обработанного стандартным методом ОВОС, составил 4,96 дБ, в то время как пик-фактор сигнала, обработанного предложенным адаптивным алгоритмом, составил 4,76 дБ. Таким образом, предложенный ал-

горитм ОВОС с адаптивно изменяемой длиной окна (АИДО) обеспечивает выигрыш в снижении пик-фактора по сравнению с обычным алгоритмом ОВОС, равный 0,2 дБ. Такое улучшение соответствует повышению КПД передатчика или повышению средней мощности излучаемого сигнала на 5%, что является достаточно хорошим результатом.

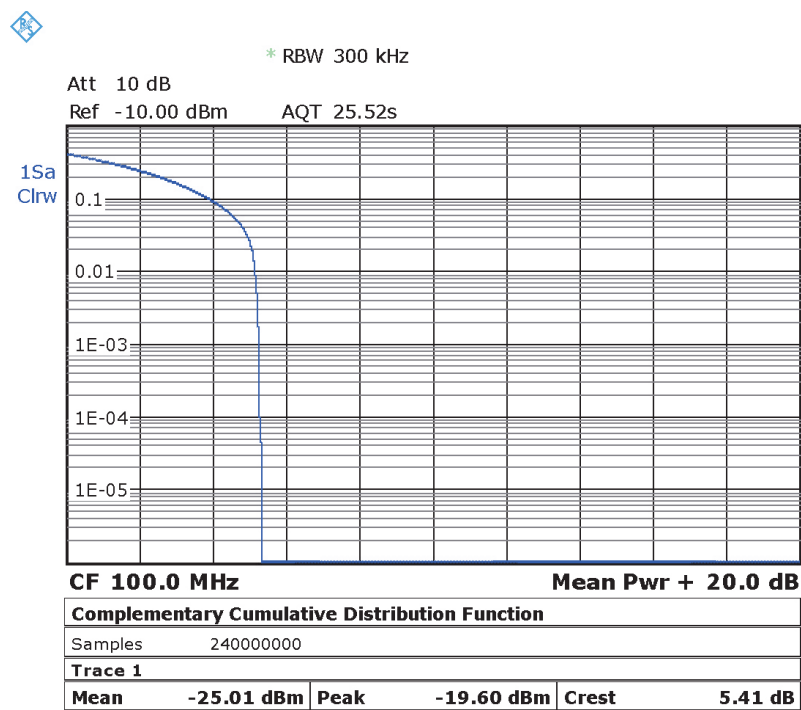
Результаты экспериментальных исследований

Для исследования сигнала DRM со сниженным пик-фактором был разработан аппаратно-программный стенд, состоящий из векторного



Date: 25.JAN.2021 14:50:34

a



Date: 25.JAN.2021 14:52:40

б

Рисунок 6. Графики CCDF сигнала DRM+ 16-QAM после снижения пик-фактора методами ОВОС (а) и ОВОС с АИДО (б)

генератора R&S SMBV100A, анализатора спектра R&S FSL, SDR-приемника ColibriDDC, а также автоматизированного рабочего места с установленным программным обеспечением (ПО):

– программный модулятор стандарта DRM Spark Modulator EDAFM v. 5.9;

– конвертер файлов для векторных генераторов R&S ARB Toolbox v.4.0;

– программный приемник DRM Dream v. 2.2.1 (zefie edition v.1.1);

– программное обеспечение SDR приемника ColibriDDC ExpertSDR2 v.1.3.1;

– виртуальная аудиокабель HiFi cable & ASIO bridge v.1.0.3.5;

– ПО собственной разработки для исследования методов снижения пик-фактора сигналов DRM CrestFactorTest v. 1.0.

В процессе испытаний с помощью программного модулятора Spark Modulator EDAFM формировался испытуемый сигнал DRM. Полученный сигнал подвергался обработке с целью снижения пик-фактора с помощью ПО CrestFactorTest, конвертировался в формат векторного генератора при помощи конвертера ARB Toolbox и загружался в векторный генератор R&S SMBV100A. Измерение пик-фактора осуществлялось анализатором спектра R&S FSL с помощью опции измерения комплементарной интегральной функции распределения (CCDF). Одновременно анализатором спектра производился контроль уровня внеполосных излучений. Контроль MER осуществлялся с помощью связки: SDR-приемник ColibriDDC – ПО ExpertSDR2 – виртуальная аудиокабель – программный приемник DRM Dream. Графики CCDF сигнала DRM+ 16-QAM после снижения пик-фактора методами ОВОС и ОВОС с АИДО приведены на рисунке 6.

Сравнение данных экспериментального исследования методов снижения пик-фактора показывает, что метод на основе предложенного адаптивного алгоритма обеспечивает выигрыш в снижении пик-фактора в размере 0,22 дБ.

Такой результат экспериментальных исследований демонстрирует, что он с достаточной степенью точности соответствует результату моделирования снижения пик-фактора сигнала с помощью разработанного ПО CrestFactorTest и эффективность предложенного алгоритма ОВОС с АИДО подтверждается.

Различия в значениях абсолютных величин пик-фактора, полученных в процессе моделирования и экспериментальных исследований, объясняются применением в последнем случае в процессе формирования сигнала DRM оконного взвешивания границ OFDM-символов с перекрытием во временной области [10]. Такая дополнительная обработка сигнала необходима для устранения резких перепадов уровня и фазы сигнала на границах OFDM-символов, вызывающих рост внеполосных излучений. Обратным эффектом такого действия является небольшой рост абсолютного значения пик-фактора.

Заключение

Исследованы параметры исходного сигнала DRM, доступные для быстрого анализа, на пред-

мет корреляции с величиной роста пик-фактора после снижения пик-фактора методом ОВОС и фильтрации. Определено влияние параметров алгоритма ОВОС на степень снижения пик-фактора, а также на прочие параметры сигнала DRM (такие как MER, уровень внеполосных излучений).

Предложен модифицированный алгоритм снижения пик-фактора сигнала DRM на основе ОВОС с АИДО. С помощью моделирования на основе ПО собственной разработки CrestFactorTest проведены сравнительные исследования метода ОВОС и метода на основе предложенного алгоритма ОВОС с АИДО.

Выполнены экспериментальные исследования энергетических и информационных характеристик сигналов DRM после снижения пик-фактора указанными методами. Результатом экспериментальных исследований стало подтверждение адекватности предложенной модели на основе ПО CrestFactorTest, а также эффективности предложенного алгоритма ОВОС с АИДО.

В качестве направления дальнейших исследований в области повышения эффективности предложенного модифицированного алгоритма снижения пик-фактора следует рекомендовать поиск методов оптимального определения параметров указанного алгоритма.

Предложенный алгоритм ОВОС с АИДО может быть рекомендован для применения в передающем оборудовании радиовещания стандарта DRM.

Литература

1. Шинаков Ю.С. Пик-фактор сигналов OFDM и нелинейные искажения в радиооборудовании систем беспроводного доступа // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 4. С. 60–64.
2. Väänänen O. Digital modulators with crest factor reduction techniques. Diss. Dr. of Science in Technology. Helsinki University of Technology, Electronic Circuit Design Laboratory, Report 42, Espoo. 2006. 127 p.
3. ГОСТ Р 54462–2011. Система цифрового радиовещания DRM. Требования и параметры. М.: Стандартинформ, 2013. 416 с.
4. 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. 26 p. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302200_302299/302245/02.01.01_60 (дата обращения: 02.02.2021).

5. Правила применения систем радиовещания. Ч. I. Правила применения эфирных цифровых радиовещательных передатчиков, работающих в диапазонах частот 0,1485–0,2835 МГц; 0,5265–1,6065 МГц; 3,95–26,10 МГц. 16 с. URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/4058> (дата обращения: 02.02.2021).
6. Рекомендации МСЭ-R BS.1660-8 (06/2019) Техническая основа для планирования наземного цифрового звукового радиовещания в полосе ОБЧ. 86 с. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1660-8-201906-I!!PDF-pdf (дата обращения: 02.02.2021).
7. Бузов А.Л., Морозов К.Ю. Методы снижения пик-фактора в радиовещательных передатчиках стандарта DRM // Радиотехника. 2019. № 6 (7). С. 24–29.
8. Väänänen O., Vankka J., Halonen K. Simple Algorithm for Peak Windowing and its application in GSM, EDGE and WCDMA systems // IEE Proceedings Communications. 2005. Vol. 152, No. 3. P. 357–362.
9. Морозов К.Ю. Оптимальная фильтрация при ограничении пик-фактора сигнала DRM+ // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 3. С. 82–89.
10. Van Nee R., Prasad R. OFDM for Wireless Multimedia Communications. Norwood: Artech House Publishers, 2000. 280 p.

Получено 11.01.2021

Минкин Марк Абрамович, д.т.н., профессор кафедры систем специальной радиосвязи (ССРС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). АО «СИП РС». 443022, Российская Федерация, г. Самара, пр. Кирова, 26, 3 этаж. Тел. +7 846 203-19-63. E-mail: mma@siprs.ru

Морозов Константин Юрьевич, соискатель кафедры ССРС ПГУТИ. АО «СИП РС». 443022, Российская Федерация, г. Самара, пр. Кирова, 26, 3 этаж. Тел. +7 846 203-20-26. E-mail: mky@siprs.ru

CREST FACTOR REDUCTION ALGORITHM FOR THE RADIO BROADCASTING SIGNALS OF DRM STANDARD BY THE WINDOWING METHOD WITH FEEDBACK WITH ADAPTIVE CHANGE OF WINDOW LENGTH

Minkin M.A., Morozov K.Y.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: mky@siprs.ru*

The problem of a high crest factor in systems with OFDM-modulation, which includes the digital radio broadcasting system of the DRM standard, makes it necessary to search for effective methods to reduce it. Among the methods of reducing the crest factor that can be applied in the DRM system, the method based on windowing with feedback stands out. Despite the fact that it is quite effective, it, like other methods, is characterized by the effect of a repeated increase in the crest factor after out-of-band emissions filtering. To further optimize this method, the parameters of the DRM signal were studied for correlation with the magnitude of the re-growth of the peak factor. On the basis of the data obtained, an adaptive algorithm of windowing with feedback using a variable window length was developed. The analysis of the proposed algorithm was carried out using a simulation model on the proprietary software CrestFactorTest. Experimental studies of the standard algorithm for reducing the crest factor based on windowing with feedback and the proposed adaptive algorithm have been carried out, which have shown the effectiveness of the latter.

Keywords: *signal analysis, OFDM symbol, broadcasting, modulator, digital filter, out-of-band emissions, MER*

DOI: 10.18469/ikt.2021.19.1.09

Minkin Mark Abramovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 26, 3 floor, Kirov Avenue, Samara, 443022, Russian Federation; Professor of Special Radio Communication Systems Department, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel. +7 846 203-19-63. E-mail: mma@siprs.ru

Morozov Konstantin Yuryevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 26, 3 floor, Kirov Avenue, Samara, 443010, Russian Federation; Applicant for the PhD degree in Technical Sciences. Tel. +7 846 203-20-26. E-mail: mky@siprs.ru

References

1. Shinakov Yu.S. Crest factor of OFDM signals and harmonic distortion in radio equipment of wireless access systems. *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2012, no. 4, pp. 60–64. (In Russ.)
2. Väänänen O. Digital modulators with crest factor reduction techniques. Diss. Dr. of Science in Technology. Helsinki University of Technology, Electronic Circuit Design Laboratory, Report 42, Espoo, 2006, 127 p.
3. GOST R 54462–2011. Digital Radio Broadcasting System DRM. Requirements and Parameters. Moscow: Standartinform, 2013, 416 p. (In Russ.)
4. 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. 26 p. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302200_302299/302245/02.01.01_60 (accessed: 02.02.2021).
5. Rules for the use of broadcasting systems. Part I. Rules for the use of terrestrial digital broadcasting transmitters operating in the frequency ranges 0.1485-0.2835 MHz; 0.5265-1.6065 MHz; 3.95-26.10 MHz. 16 p. URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/4058> (accessed: 02.02.2021).
6. Recommendation ITU-R BS.1660-8 (06/2019) Technical basis for planning terrestrial digital sound broadcasting in the VHF band. 86 p. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1660-8-201906-I!!PDF-pdf (accessed: 02.02.2021).
7. Buzov A.L., Morozov K.Yu. Crest factor reduction techniques in DRM broadcast transmitters. *Radiotekhnika*, 2019, no. 6 (7), pp. 24–29. (In Russ.)
8. Väänänen O., Vankka J., Halonen K. Simple Algorithm for Peak Windowing and its application in GSM, EDGE and WCDMA systems. *IEE Proceedings Communications*, 2005, vol. 152, no. 3, pp. 357–362.
9. Morozov K.Yu. Optimal filtering while limiting the crest factor of the DRM + signal. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 82–89. (In Russ.)
10. Van Nee R., Prasad R. *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Norwood: Artech House Publishers, 2000, 280 p.

Received 11.01.2021

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 004.056.53

ВЫЯВЛЕНИЕ DOS-АТАК С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФИКА

Поздняк И.С., Плаван А.И.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: i.pozdnyak@psuti.ru*

В настоящее время количество проводимых каждый день атак во всем мире постоянно увеличивается. Причем злоумышленники используют наряду со старыми способами и инструментами новые, ранее неизвестные. Обнаружить их становится все сложнее. В данной статье рассматривается проблема выявления аномальной составляющей в трафике, обусловленной деятельностью злоумышленников или неисправностями сети. Для этого проводится моделирование атаки типа отказ в обслуживании и осуществляется захват соответствующего трафика с целью его дальнейшего анализа. Сравниваются статистические характеристики трафика, соответствующего нормальному состоянию системы и состоянию активной атаки. По результатам анализа делается вывод о нали-