

УДК 621.391

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-177-188

Для цитирования: Моделирование алгоритмов уменьшения пик-фактора OFDM сигналов и реализация наилучшего метода для канала с замираниями / П. В. Луферчик, А. Н. Конев, Е. В. Богатырев, Р. Г. Галеев // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 177–188. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-177-188.

For citation: Luferchik P. V., Konev A. N., Bogatyrev E. V., Galeev R. G. [Simulation of algorithms for reducing the peak factor of OFDM signals and implementation of the best method for fading channel]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 177–188. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-177-188.

Моделирование алгоритмов уменьшения пик-фактора OFDM сигналов и реализация наилучшего метода для канала с замираниями

П. В. Луферчик*, А. Н. Конев, Е. В. Богатырев, Р. Г. Галеев

АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»
Российская Федерация, 660021, г. Красноярск, ул. Декабристов, 19
*E-mail: Luferchikp@gmail.com

Реализация эффективных систем связи с высокими скоростями передачи данных требует применения сигналов с высоким порядком модуляции. Современные тенденции развития систем связи направлены на применение ортогонального частотного мультиплексирования сигналов (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), позволяющего гибко менять скорость передачи данных, уменьшить частотный ресурс за счет улучшения спектральной эффективности, а также бороться с частотно-селективными замираниями и селективными помехами. Однако цена такого решения также велика. Высокий пик-фактор (PAPR) OFDM сигналов накладывает требование к линейности аналогового тракта, существенно уменьшая КПД выходных усилителей передатчика и приемника, увеличивая габариты и электропотребление системы связи в целом.

В данной статье представлено краткое описание современных алгоритмов уменьшения пик-фактора OFDM сигналов, таких как Amplitude Clipping and Filtering (ACF), Peak Shrinking and Interpolation (PSI), Peak Cancellation Crest-Factor Reduction (PC-CFR), Partial Transmit Sequence (PTS), Discrete Fourier Transform spread OFDM (DFT-s-OFDM), Active Constellation Extension (ACE), Tone Reservation (TR). Представлены результаты моделирования наиболее перспективных алгоритмов понижения пик-фактора для модуляций QPSK, QAM16, QAM64, QAM128 и QAM256 в составе OFDM сигнала. Разработан и промоделирован метод комбинации наиболее подходящих алгоритмов уменьшения пик-фактора. Приведена структурная схема метода, характеристики структурных блоков системы; описана реализация схемы алгоритма в программной среде Simulink.

Практическая новизна работы заключается в возможности использования разработанного метода уменьшения пик-фактора в системах со сложными каналами связи, таких как системы тропосферной и ближнепольной магнитной связи, где наблюдается значительное влияние селективных помех, межсимвольной интерференции, частотно-селективных замираний. Также результаты данной работы позволяют ориентироваться в большом количестве алгоритмов уменьшения пик-фактора OFDM сигналов и применить нужный алгоритм в конкретной задаче.

Ключевые слова: пик-фактор, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, межсимвольная интерференция, цифровая обработка сигналов, канал с замираниями, тропосферная связь, ближнепольная магнитная связь.

Simulation of algorithms for reducing the peak factor of OFDM signals and implementation of the best method for fading channel

P. V. Luferchik*, A. N. Konev, E. V. Bogatyrev, R. G. Galeev

JSC "Scientific and Production Enterprise "Radiosvyaz"
19, Dekabristov St., Krasnoyarsk, 660021, Russian Federation
*E-mail: Luferchikp@gmail.com

The implementation of efficient communication systems with high data transfer rates requires the usage of signals with a high modulation order. Current trends in the development of communication systems are aimed at orthogonal frequency multiplexing of signals (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) usage, which allows you to flexibly change the data transfer rate, to reduce the frequency resource by improving spectral efficiency, as well as to combat frequency-selective fading and selective interference. However, the price of such a solution is also high. The high peak-to-average power ratio (PAPR) OFDM signals imposes a requirement for the linearity of the analogical path, significantly reducing the efficiency of the transmitter and receiver output amplifiers, increasing the dimensions and power consumption of the communication system as a whole.

The practical novelty of the work lies in the possibility of using the developed method for reducing the PAPR factor in systems with complex communication channels, such as troposcatter and near-field magnetic induction communication systems, where significant effect of selective interference, intersymbol interference, and frequency-selective fading is present. The results of this work give the opportunity to navigate a large number of algorithms for reducing the peak factor of OFDM signals and apply the desired algorithm in a specific task.

Keywords: peak-to-average power ratio, orthogonal frequency division multiplexing, intersymbol interference, digital signal processing, fading channel, tropospheric communication, near-field magnetic communication.

Введение

Передача данных со многими поднесущими в форме мультиплексирования с ортогональным частотным разделением широко признана как одна из перспективных схем доступа для использования в разрабатываемых системах беспроводной связи [1]. Этот режим передачи данных используется в наземном телевизионном вещании, в системах связи поколения 4G и 5G и др. [2] Принцип работы OFDM заключается в том, чтобы высокоскоростная передача данных разбивалась на множество потоков передачи данных с меньшими скоростями. Далее эти потоки параллельно поступают на ортогональные подканалы. На каждом подканале может быть независимо расположен свой тип модулятора: BPSK, QPSK, QAM и т. д. [3]. Такая универсальность позволяет гибко задавать скорость передачи данных, эффективно бороться с селективными замираниями и помехами [4–7].

PAPR зависит от числа поднесущих у рассматриваемого сигнала, а также от модуляции. Количество поднесущих определяется предполагаемым радиоканалом, в котором будет использоваться система связи. Для каналов с сильным влиянием селективных замираний и значительной межсимвольной интерференцией, оптимальное число поднесущих начинается от 2048. OFDM символ с $N = 2048$ использующихся поднесущих будет иметь максимально возможный PAPR для QPSK равный $10 \cdot \log_{10}(N) = 33,3$ дБ, а для QAM-256 $10 \cdot \log_{10}(2.6 \cdot N) = 37,3$ дБ [8].

Определение PAPR. Пусть P – вектор, содержащий мощности всех отсчетов некоторого OFDM символа, [Вт], $P_{av} = \text{sum}(P)/\text{length}(P)$ – средняя мощность данного OFDM символа, [Вт]. Тогда пик-фактор рассматриваемого OFDM символа

$$PAPR = 10 \log \left(\frac{\max \{P\}}{P_{av}} \right) [\text{дБ}], \quad (1)$$

где $\max \{P\}$ – функция, определяющая наибольшее значение среди вектора значений P .

Под эффективностью или производительностью алгоритмов снижения PAPR далее будем подразумевать то, как сильно алгоритм снижает PAPR OFDM символа после обработки. Например, алгоритм, который снижает PAPR на 3 дБ (при прочих равных) более эффективен (производителен), чем тот, что снижает его на 1 дБ.

В зарубежной и отечественной литературе имеется множество алгоритмов уменьшения пик-фактора OFDM сигналов, позволяющих ослабить требования к аналоговому тракту передачи и приема. Были проанализированы следующие алгоритмы: Peak Cancellation Crest-Factor Reduction (PC-CFR), Partial Transmit Sequence (PTS), Selected Mapping (SLM), Discrete Fourier Transform spread OFDM (DFT-s-OFDM), Active Constellation Extension (ACE), Tone Reservation (TR).

Алгоритмы прямого ограничения сигнала

Алгоритмы прямого ограничения сигнала [9; 10] (Peak Shrinking and Interpolation (PSI), Peak Cancellation Crest-Factor Reduction (PC-CFR), Amplitude Clipping and Filtering) ограничивают сигнал по определенному уровню, нивелируя последствия данной операции. Они дают средний результат снижения PAPR. Это достигается ценой значительного ухудшения битовой ошибки всей системы связи в целом. Появляется внеполосное излучение, которое приходится уменьшать путем дополнительной фильтрации, что добавляет к сложности реализации данного алгоритма.

Алгоритм Partial Transmit Sequence

Алгоритм Partial Transmit Sequence (PTS) разделяет входной OFDM блок на W подблоков, над которыми производится W отдельных операций ОБПФ (обратное быстрое преобразование Фурье), результаты умножаются на W оптимизационных коэффициентов и суммируются друг с другом.

Коэффициенты $K_1, K_2 \dots K_M$ имеют V разрешенных значений. Данные коэффициенты вычисляются таким образом, чтобы минимизировать PAPR выходного символа. Структурная схема данного метода представлена на рис. 1.

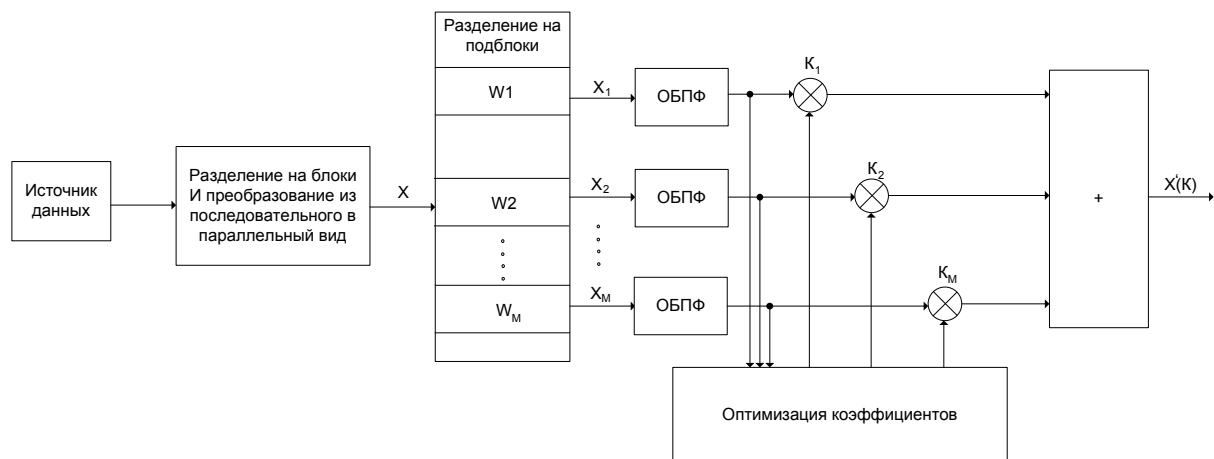


Рис. 1. Структурная схема PTS

Fig. 1. Block diagram of PTS

Далее проводилось моделирование работы алгоритма PTS при разных сочетаниях блоков W и V разрешенных значений коэффициентов. На рис. 2 приведен результат снижения PAPR в зависимости от CCDF (кумулятивная функция распределения). Показано, что при увеличении количества разрешенных значений коэффициентов V растет эффективность работы алгоритма. Увеличение блоков W приводит к незначительному уменьшению пик-фактора. Данный алгоритм требует дополнительной обработки на приемной стороне и дополнительного канала для

передачи данных коэффициентов приемнику ($\log_2(W^M - 1)$ бит на OFDM символ. Резюмируя, его производительность низкая, если учитывать вычислительную сложность.

Алгоритм Selected Mapping

Алгоритм Selected Mapping (SLM) [11] схож с PTS. Передатчик создает несколько потенциальных OFDM блоков данных, из которых выбирается блок с наименьшим показателем PAPR. Каждый блок данных X умножается на U различных фазовых последовательностей B , каждая длиной N , $B(u) = [bu_0, bu_1, \dots, bu_{N-1}]T$. К результату применяется ОБПФ, таким образом, получая U OFDM блоков $x(1), x(2), \dots, x(U)$. В итоге среди них выбирается тот блок, что имеет наименьшее значение максимума. Эффективность снижения PAPR зависит от числа фазовых последовательностей, что также увеличивает число необходимых ОБПФ блоков. Также в классической реализации требуется дополнительный канал данных для передачи приемнику фазовых коэффициентов. Сложность реализации упирается в U ОБПФ блоков.

На рис. 3 показаны результаты работы алгоритма при $U = 4$ для OFDM символа с потоком данных QAM-256. Видно, что уменьшение PAPR составляет около 2 дБ. Резюмируя, производительность алгоритма низкая, если учитывать вычислительную сложность.

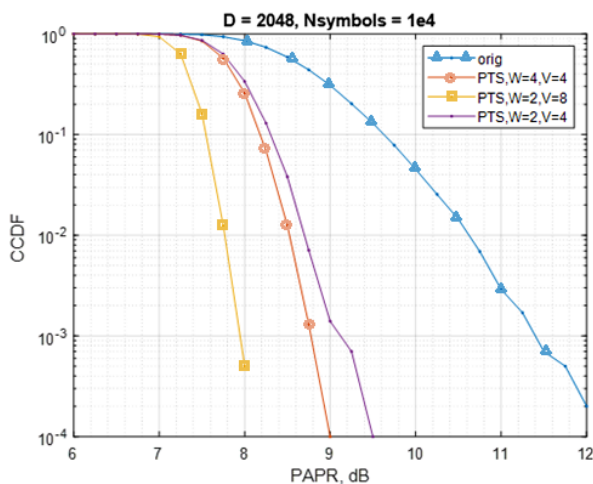


Рис. 2. Результат обработки OFDM сигнала алгоритмом PTS

Fig. 2. Result of OFDM signal processing by the PTS algorithm

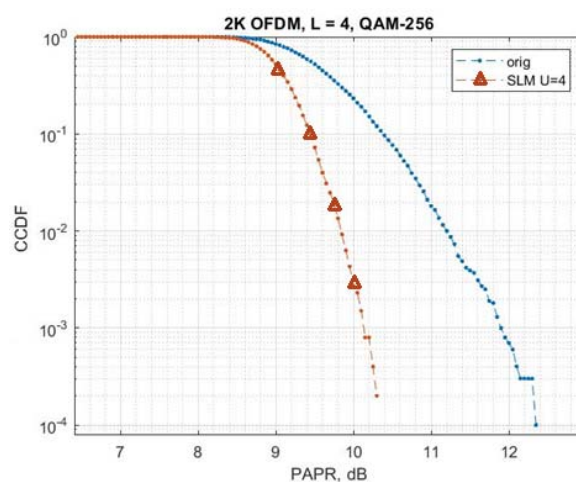


Рис. 3. Результат обработки OFDM сигнала алгоритмом SLM

Fig. 3. The result of OFDM signal processing by the SLM algorithm

Алгоритм DFT-spread-OFDM

Подход DFT-spread-OFDM широко используется при передаче сигнала по восходящей линии в стандартах мобильной связи LTE (Long-Term Evolution) и 5G NR (SC-OFDMA) [12]. Принцип работы алгоритма заключается в прекодировании поднесущих с данными при помощи БПФ (быстрое преобразование Фурье) на стороне передатчика до OFDM модуляции. На стороне приемника после OFDM демодуляции блок также декодируется с помощью дополнительной операции ОБПФ. Производительность метода не зависит от модуляции сигнала.

Качество работы алгоритма DFT-spread-OFDM оценивалось на LTE сигнале с модуляцией QAM-4 и полосой 20 МГц. На рис. 4 показаны результаты моделирования алгоритма. UL – кривая пик-фактора после алгоритма, DL – сигнал без алгоритма, DL x8 – сигнал с увеличенным разрешением в 8 раз.

На рис. 4 видно, что алгоритм DFT-spread-OFDM уменьшает PAPR на 2,4 дБ. Резюмируя, производительность алгоритма средняя, при низкой вычислительной сложности.

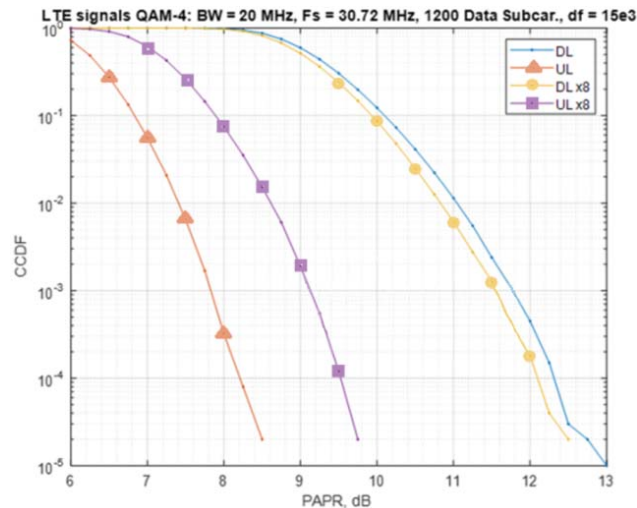


Рис. 4. Результат обработки OFDM сигнала методом DFT-spread-OFDM

Fig. 4. The result of OFDM signal processing by the DFT-spread-OFDM method

Алгоритм Tone Reservation

Алгоритм Tone Reservation (TR) является очень гибким методом. Его производительность сильно зависит от выбранного кернел-блока и числа итераций. В работе [13] подробно описан процесс и подходы проектирования кернел-блока, а также сам алгоритм TR.

На рис. 5 представлена структурная схема алгоритма TR [14], из которой видно, что во входном OFDM блоке x ищется максимальное значение по модулю, а также его позиция (Peak detection), затем производится циклический сдвиг (Circular shifting) хранящегося в памяти кернел-блока (Reference kernel) на соответствующее позиции максимума число отсчетов. Затем ищется оптимальный коэффициент в блоке Scale and phase rotating, который умножается на циклически сдвинутый кернел-блок, получая сигнал C_n . Далее сигнал C_n складывается с входным OFDM сигналом X_n , получая блок y с уменьшенным PAPR относительно X_n .

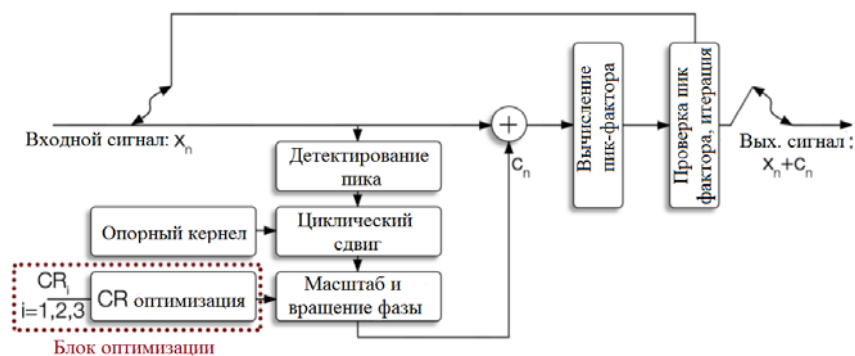


Рис. 5. Структурная схема алгоритма TR

Fig. 5. Block diagram of the TR algorithm

Преимущества алгоритма TR: экономичен по ресурсам ПЛИС, не искажает сигнал, одинаково эффективен для всех типов модуляции (от QAM-4 до QAM-256) и не требует обратного канала. Недостатки алгоритма TR: снижает потенциально возможную скорость передачи данных, повышает среднюю мощность сигнала, требует от 10 итераций для высокой эффективности, немного ухудшает BER (из-за увеличения средней мощности сигнала).

Эффективность работы алгоритма TR оценивалась на сигнале с модуляцией QAM-16. Результат работы алгоритма приведены на рис. 6.

Алгоритм моделировался для 2048 поднесущих с 10 итерациями, где использовался kernel-блок из стандарта DVB-T2. Процент TR поднесущих относительно всех полезных поднесущих меньше 5 %, поэтому были рассмотрены kernel-блоки с большим числом TR поднесущих (5, 10 и 20 %) и с разным количеством итераций, как показано на рис. 7.

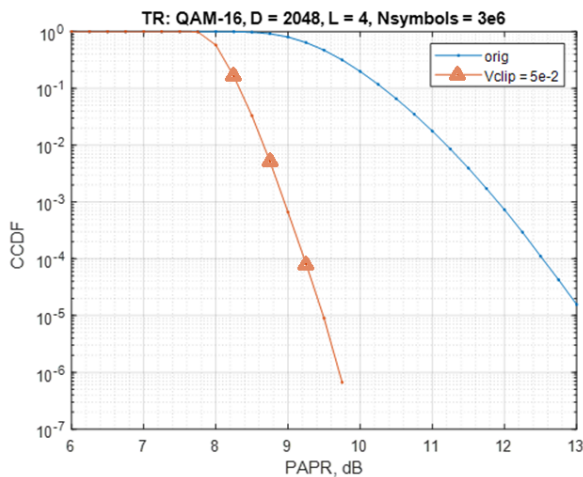


Рис. 6. Результат обработки OFDM сигнала алгоритмом TR (DVB-T2)

Fig. 6. Result of OFDM signal processing by TR algorithm (DVB-T2)

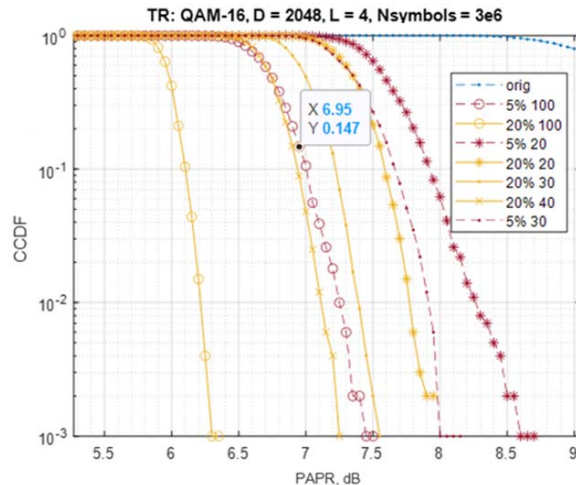


Рис. 7. Результат обработки OFDM сигнала алгоритмом TR

Fig. 7. Result of OFDM signal processing by the TR algorithm

Тип модуляции на понижение пик-фактора в алгоритме TR не влияет, поэтому аналогичный выигрыш будет для всех созвездий. Видно, что алгоритм может давать снижение PAPR от 3 дБ (5 % 10 итераций) до 5,8 дБ (20 % 100 итераций). Резюмируя, TR имеет хорошую производительность при средней сложности.

Алгоритм Active Constellation Extension

Алгоритм Active Constellation Extension (ACE) использует возможность расширения сигнального созвездия по бокам без искажения передаваемых символов [15]. Очевидно, что с повышением порядка модуляции число символов, которые можно расширить в бок будет сокращаться относительно общего числа символов, что будет сказываться на производительности алгоритма. Так, для QPSK 100 % символов можно расширить вбок, а для QAM-16 только 75 %.

На рис. 8 представлена структурная схема алгоритма ACE, где блоки FFT и IFFT выполняют функцию БПФ и ОБПФ. Блок Clip ограничивает сигнал во временной области по заданному уровню и операция 4x-FFT(БПФ) переносит сигнал обратно в частотную область.

Между полученными после ограничения поднесущими X' и исходными поднесущими X ищется разница в блоке Clip. Данная разница представляет собой набор комплексных векторов со случайной фазой, далее определяются только те вектора, которые указывают в разрешенном для соответствующей поднесущей (символа) направлении. Это делается с помощью фильтрующей логики, в результате получается сигнал C . Далее сигнал C при помощи 4-х IFFT(ОБПФ) переводится в вектор c . Затем по максимуму амплитуды OFDM блока и проекции вектора c на исходный сигнал x определяется балансирующий коэффициент u , который вместе с c используется при корректировке входного сигнала ($y = x + u \cdot c$).

Преимущества алгоритма ACE: никак не влияет на скорость передачи данных, не имеет обратного канала, не искажает сигнал. Недостатки алгоритма ACE: эффективность снижается по

мере повышения порядка модуляции (от QAM-4 до QAM-256), повышает среднюю мощность сигнала, сложен в аппаратной реализации (требует 3 операции FFT), ухудшает BER (из-за увеличения средней мощности сигнала).

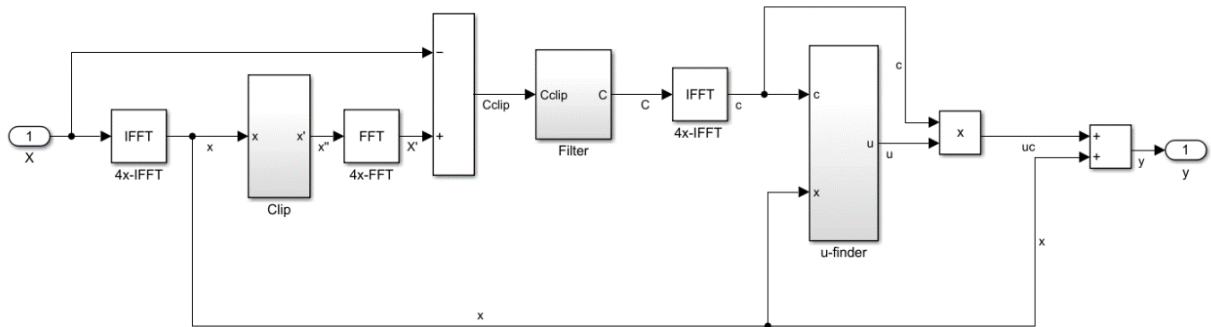


Рис. 8. Структурная схема алгоритма ACE

Fig. 8. Block diagram of the ACE algorithm

На рис. 9 показаны результаты работы ACE для 4-QAM OFDM сигнала. После первой итерации (кривая ace x1) PAPR сократился на 4,4 дБ, после второй итерации (кривая ace x2) – еще на 1,2 дБ, а суммарно – на 5,6 дБ. Резюмируя, ACE имеет хорошую производительность при средней сложности.

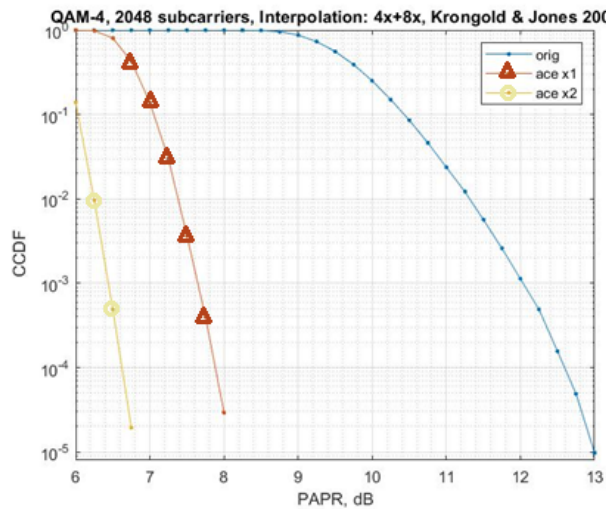


Рис. 9. Результат обработки OFDM сигнала алгоритмом ACE

Fig. 9. Result of OFDM signal processing by ACE algorithm

Комбинация алгоритмов снижения PAPR

Комбинация нескольких алгоритмов понижения пик-фактора может дать большее понижение пик-фактора, чем каждый алгоритм по отдельности. Так, имеется возможность осуществить комбинацию алгоритмов ACE и TR.

Структурная схема блока комбинации алгоритмов снижения PAPR представлена на рис. 10. В предлагаемой реализации на входной сигнал сначала применяется алгоритм ACE, затем TR. На рис. 11 представлена подсистема ACE, на рис. 12 – подсистема PAPR.

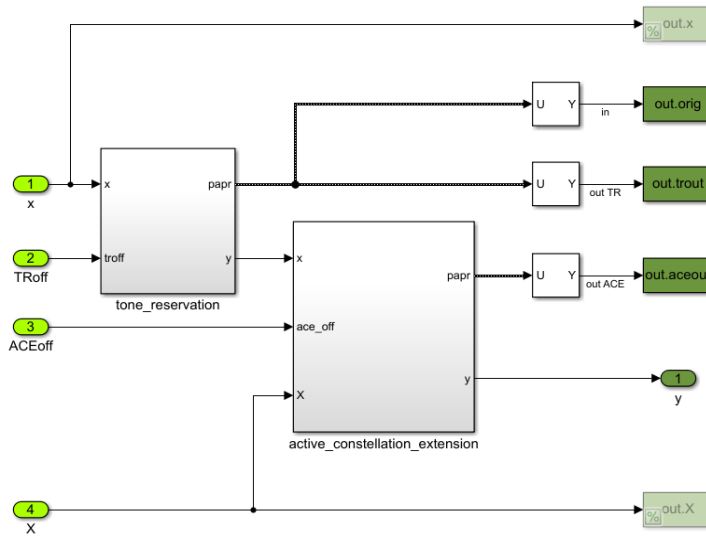


Рис. 10. Структурная схема комбинированной системы снижения пик-фактора

Fig. 10. Structural diagram of the combined PAPR reduction system

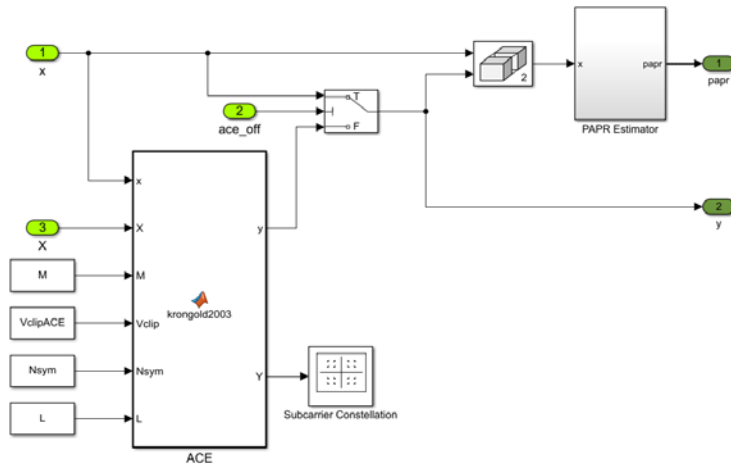


Рис. 11. Структурная схема подсистемы ACE

Fig. 11. Structural diagram of the ACE subsystem

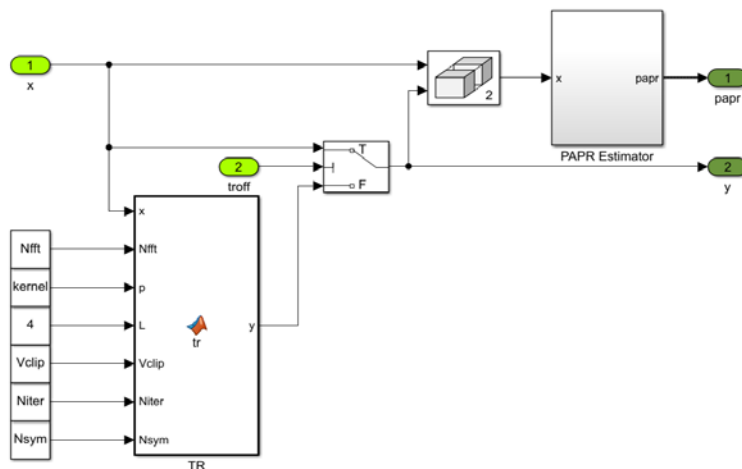


Рис. 12. Структурная схема подсистемы TR

Fig. 12. Structural diagram of the TR subsystem

Программная реализация алгоритма ACE изображена на рис. 13, программная реализация алгоритма TR – на рис. 14.

```

1 function [y,Y] = krongold2003(x,X,M,Vclip,Nsym,NsymH, L)
2 Nfft = 2048;
3 x = x*L;
4 X = X*L;
5 %% SGP-ACE proc.
6 for j = 1:Nsym
7     if j <= NsymH
8         extborder = 2;
9     else
10         if M == 256 || M == 128 || M == 64
11             extborder = 4;
12         elseif M == 16
13             extborder = 2.82;
14         else
15             extborder = 2;
16         end
17     end
18     x1 = x((j-1)*Nfft*L+1:j*Nfft*L);
19     XL = fftshift(X((j-1)*Nfft*L+1:j*Nfft*L));
20     %1) Starting with the data symbols in X ...
21     avp = mean(abs(x1).^2); % Symbol average power
22     % 2) Clip
23     A = sqrt(avp*10^(Vclip/10)); % !! Convert clipping level (dB to V)
24     x11 = x1;
25     x11(abs(x1) > A) = A*exp(1i*angle(x1(abs(x1) > A)));
26     % 3) Compute the clipped signal portion
27     cclip = x11-x1;
28     % 4) FFT
29     Cclip = fft(cclip)/sqrt(length(cclip));
30
31     % 5) Keep only extension with acceptable direction
32     X1 = XL+1*Cclip;
33     absRe = abs(real(X1));
34     absIm = abs(imag(X1));
35
36     reisext = absRe < abs(real(X1)) & absRe >= extborder & absIm > 0;
37     imisext = absIm < abs(imag(X1)) & absIm >= extborder & absIm > 0;
38
39     Cre = zeros(Nfft*L,1);
40     Cim = zeros(Nfft*L,1);
41     Cre(reisext) = real(Cclip(reisext));
42     Cim(imisext) = imag(Cclip(imisext));
43     C = complex(Cre,Cim);
44
45     c = ifft(C)*sqrt(length(C));
46
47     % Determine a step size u
48     % 1') Find max sample
49     [E,nmax] = max(abs(x1));
50     % 2') Compute projection of c
51     cproj = real(x1.*conj(c))./abs(x1);
52     % 3') Compute approx balancing
53     u = (E-abs(x1(cproj > 0)))./(cproj(cproj > 0)-cproj(nmax));
54     % 4') Find minimum u
55     if isempty(u(u>0))
56         mu = 1;
57     else
58         mu = min(u(u>0));
59     end
60     % 6) Compute x[i+1]
61     X((j-1)*Nfft*L+1:j*Nfft*L) = XL+mu*C; % For next iteration
62     x((j-1)*Nfft*L+1:j*Nfft*L) = x1+mu*c; % Output
63 end
64 Y = X*0.25;
65 y = x*0.25;

```

Рис. 13. Программная реализация алгоритма ACE

Fig. 13. Software implementation of the ACE algorithm

```

1 function y = tr(x,Nfft,p,L,Vclip, Niter, Nsym)
2 % Алгоритм TR
3 for j = 1:Nsym
4     for i = 1:Niter
5         [yi, mi] = max(abs(x((j-1)*Nfft*L+1:j*Nfft*L))); % Search of maximum
6         if yi <= Vclip
7             break
8         end
9         kernel = [p(Nfft*L-mi+2:Nfft*L); p(1:Nfft*L-mi+1)]; % Kernel-block shift
10        alpha = x((j-1)*Nfft*L+mi)/yi*(yi-Vclip); % Search for scale coef.
11        x((j-1)*Nfft*L+1:j*Nfft*L) = x((j-1)*Nfft*L+1:j*Nfft*L) - alpha*kernel; % Correct
12    end
13 end
14 y = x;

```

Рис. 14. Программная реализация алгоритма TR

Fig. 14. Software implementation of the TR algorithm

Графики вероятности превышения PAPR показаны на рис. 15 для 10000 OFDM символов для основных модуляций и всех режимов. К данным графикам можно обращаться также при рассмотрении работы алгоритма TR отдельно от ACE.

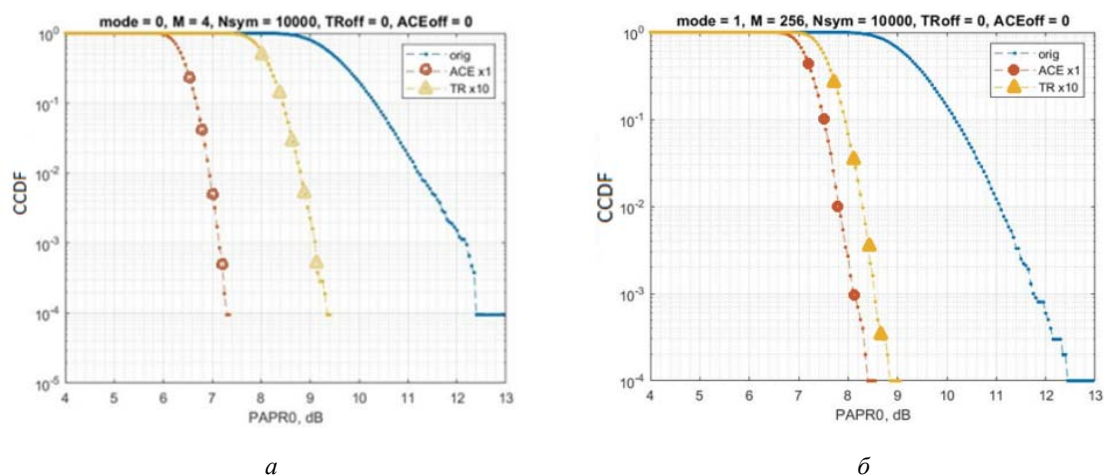


Рис. 15. Результат снижения пик-фактора алгоритмами ACE и TR:

а – для QPSK; б – 256-QAM сигнала

Fig. 15. The result of reducing the crest factor by the ACE and TR algorithms:

а – for QPSK; б – 256-QAM signal

Закключение

В статье приведены основные методы уменьшения пик-фактора OFDM сигналов, пригодные для использования в каналах, подверженных значительному влиянию селективных помех, межсимвольной интерференции, частотно-селективных замираний.

Применение алгоритмов понижения пик-фактора позволяет существенно ослабить требования к линейности усилителя передатчика системы связи. Приведена программная реализация комбинированного метода борьбы в программной среде Simulink, который, в дальнейшем, будет реализован в серийном изделии. Комбинация алгоритмов ACE и TR дает возможность уменьшить пик-фактор для OFDM сигналов ~5,5 дБ для BPSK потока данных и ~4,5 дБ для 8-PSK, QAM-16, QAM-64, QAM-128 и QAM-256 потоков данных, тем самым повысить эффективность системы связи в целом.

Библиографические ссылки

1. Технология OFDM / М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин, А. М. Шлома, А. П. Шумов. М. : Горячая линия – Телеком, 2017. 360 с.

2. Sethy N., Swain S. BER Analysis of MIMI-OFDM system in different fading channel // International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management. 2013. Vol. 2, No. 4. P. 405–409.
3. BER Analysis of Clipping Process in the Forward Link of the OFDM-FDMA Communication System / H. G. Ryu, T. P. Hoa, N. T. Hieu, J. Jianxue // IEEE Transactions of Consumer Electronics. 2004. Vol. 50, No. 4. P. 1058–1064.
4. Umesha G. B., Shanmukha Swamy M. N. Performance of OFDM System for Wireless Communication through Channel Estimation // International Journal of Electronics, Electrical and Computational System. 2017. Vol. 6, No. 1. P. 21–26.
5. Hu M. K., Chen Xihong. New generation Troposcatter Communication Based on OFDM Modulation // Proceedings of the International Conference on Electronic Measurement & Instruments 2009 (ICEMI'09). Beijing (China), 2009. P. 164–167.
6. Wang F. The Application of MIMO-OFDM System. in troposcatter communication // Proceedings of the International Conference on in Microwave and Millimeter Wave Technology, ICMMT 2008. Nanjing (China), 2008.
7. Performnce of OFDM System Under Troposcatter Fading Channels / M. K. Hu, J. Z. Hu Sun, X. H. Chen, Q. Zhang // Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition). 2013. Vol. 43, No. 1. P. 212–216.
8. Ding L. Memory polynomial predistorter based on the indirect learning architecture // Proc. of GLOBECOM. 2002. Vol. 1. P. 967–971.
9. Mehdi Hosseinzadeh Aghdam, Abbas Ali Sharif. PAPR reduction in OFDM systems: An efficient PTS approach based on particle swarm optimization. Department of Computer Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.
10. Singh M., Patra S. K. Partial transmit sequence optimization using improved harmony search algorithm for PAPR reduction in OFDM // ETRI J. 2017. No. 39 (6). P. 782–793.
11. Lee B. M., Kim Y., R.P.F. Performance analysis of the clipping scheme with SLM technique for PAPR reduction of OFDM signals in fading channels // Wirel. Pers. Commun. 2012. No. 63 (2). P. 331–344.
12. DFT-Spread OFDM with Frequency Domain Reference Symbols / Alphan Şahin, Erdem Bala, Rui Yang, Robert L. Olesen // GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global communications Conference.
13. Filippo Tosato, Magnus Sandell, Makoto Tanahashi. Tone Reservation for PAPR Reduction: an Optimal Approach through Sphere Encoding. IEEE ICC 2016 – Signal Processing for Communications Symposium.
14. Sandeepkumar Vangalaa , Anuradha Sundrub. Adaptive Clipping Active Constellation Extension for PAPR Reduction of OFDM/OQAM System. 6th International Conference On Advances In Computing & Communications, ICACC 2016, 6–8 September 2016, Cochin, India.
15. Gayatri Sanadhya, Jitendra Yadvendra. PAPR Reduction Using PTS, SLM and Cuckoo Search Optimized Companding // 2018 2nd International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE). 2018. P. 168–175.

References

1. Bakulin M. G., Kreyndelin V. B., Shloma A. M., Shumov A. P. Tehnologiya OFDM. Uchebnoye posobiye dlya vuzov [OFDM Technology. Textbook for high educational establishments]. Moscow, Hotline – Telecom Publ., 2017, 360 p.
2. Sethy N., Swain S. BER Analysis of MIMI-OFDM system in different fading channel. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management. 2013, Vol. 2, No. 4, P. 405–409.
3. Ryu H. G., Hoa T. P., Hieu N. T., Jianxue J. BER Analysis of Clipping Process in the Forward Link of the OFDM-FDMA Communication System. IEEE Transactions of Consumer Electronics. 2004, Vol. 50, No. 4, P. 1058–1064.

4. Umesha G. B., Shanmukha Swamy M. N. Performance of OFDM System for Wireless Communication through Channel Estimation. International Journal of Electronics, Electrical and Computational System. 2017, Vol. 6, No. 1. P. 21–26.
5. Hu M. K., Chen Xihong. New generation Troposcatter Communication Based on OFDM Modulation. In Proceedings of the International Conference on Electronic Measurement & Instruments 2009 (ICEMI'09). Beijing (China), 2009, P. 164–167.
6. Wang F. The Application of MIMO-OFDM System. in troposcatter communication. In Proceedings of the International Conference on in Microwave and Millimeter Wave Technology, ICMMT 2008. Nanjing (China), 2008.
7. Hu M. K., Hu Sun J. Z., Chen X. H., Zhang Q. Performance of OFDM System Under Troposcatter Fading Channels. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition). 2013. Vol. 43, No. 1. P. 212–216.
8. Ding L. Memory polynomial predistorter based on the indirect learning architecture. Proc. of GLOBECOM. 2002. Vol. 1. P. 967–971.
9. Mehdi Hosseinzadeh Aghdam, Abbas Ali Sharif. PAPR reduction in OFDM systems: An efficient PTS approach based on particle swarm optimization. Department of Computer Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran.
10. Singh M., Patra S. K. Partial transmit sequence optimization using improved harmony search algorithm for PAPR reduction in OFDM. ETRI J. 2017. No. 39 (6). P. 782–793.
11. Lee B. M., Kim Y., R.P.F. Performance analysis of the clipping scheme with SLM technique for PAPR reduction of OFDM signals in fading channels. Wirel. Pers. Commun. 2012. No. 63 (2). P. 331–344.
12. Alphan Şahin, Erdem Bala, Rui Yang, Robert L. Olesen. DFT-Spread OFDM with Frequency Domain Reference Symbols. GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global communications Conference.
13. Filippo Tosato, Magnus Sandell, Makoto Tanahashi. Tone Reservation for PAPR Reduction: an Optimal Approach through Sphere Encoding. IEEE ICC 2016 – Signal Processing for Communications Symposium.
14. Sandeepkumar Vangalaa, Anuradha Sundrub. Adaptive Clipping Active Constellation Extension for PAPR Reduction of OFDM/OQAM System. 6th International Conference On Advances In Computing & Communications, ICACC 2016, 6-8 September 2016, Cochin, India.
15. Gayatri Sanadhya, Jitendra Yadvendra. PAPR Reduction Using PTS, SLM and Cuckoo Search Optimized Companding. 2018 2nd International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE). 2018, P. 168–175.

© Луферчик П. В., Конев А. Н., Богатырев Е. В., Галеев Р. Г., 2022

Луферчик Павел Валерьевич – начальник отдела; АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: Luferchikp@gmail.com.

Конев Александр Николаевич – инженер-конструктор 3 категории; АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: FBRLC@ya.ru.

Богатырев Евгений Владимирович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научно-техническому развитию; АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: info@krtz.su.

Галеев Ринат Гайсеевич – доктор технических наук, генеральный директор; АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: info@krtz.su.

Luferchik Pavel Valerievich – Head of the Department; JSC SPE “Radiosvyaz”. E-mail: Luferchikp@gmail.com.

Konev Aleksandr Nikolayevich – Design Engineer 3rd category; JSC SPE “Radiosvyaz”. E-mail: FBRLC@gmail.com

Bogatyrev Evgeny Vladimirovich – Cand. Sc., Deputy General Director for Scientific and Technical Development; JSC SPE “Radiosvyaz”. E-mail: info@krtz.su.

Galeev Rinat Gaiseevich – Dr. Sc., General Director; JSC SPE “Radiosvyaz”. E-mail: info@krtz.su.
