

УДК 654.16

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ВСПЛЕСКА В СИГНАЛЕ С OFDM

В.А. АКСЕНОВ, С.В. СМОЛЯК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 15 марта 2021*

Аннотация. На основе детерминизма алгоритма формирования сигнала с OFDM рассмотрен метод вычисления временной точки на длительности символа, где может сформироваться экстремальный по величине, или близкий к нему, всплеск в структуре сигнала. Этот метод рассматривается, как составная часть группы более общих методов снижения пик-фактора сигнала OFDM без внесения искажений. Наиболее простым кажется применение предлагаемого подхода к формированию радиоблока узкополосного интернета вещей NB-IoT, где присутствует всего лишь 12 поднесущих.

Ключевые слова: OFDM, пик-фактор, PAPP, ортогональные поднесущие, текущая фаза, экстремальный всплеск, радиоблок NB-IoT.

Введение

Ключевым недостатком сигналов с OFDM является их большой пик-фактор. Это означает, что сумма гармонических поднесущих в структуре такого сигнала склонна давать очень большие амплитудные всплески на фоне относительно небольшого среднего значения сигнала на длительности информационного символа. Большой пик-фактор создает проблемы в разработке и применении выходных радиосуилителей и антенно-фидерных устройств в целом. В мире отмечается рост критики применения таких радиосигналов с точки зрения их влияния на здоровье пользователей.

Показательно, что в рамках программы разработки радиосистем шестого поколения 6G, именуемой FG-NET2030, чуть-ли не единственной задачей при разработке нового радиоинтерфейса является поиск OFDM-подобных сигналов, но с существенно сниженными пиковыми выбросами [1].

В научной литературе и реальной инженерной практике предложены и используются несколько методов снижения пик-фактора сигналов с OFDM [2–4]. К сожалению, ни один из этих методов не может быть назван наилучшим по всей совокупности предъявляемых к нему критериев.

Формирование экстремального всплеска в сумме ортогональных поднесущих

Все упомянутые выше методы снижения пик-фактора сигналов с OFDM можно разделить на три группы. К первой относятся методы компрессии (ограничения) по уровню уже сформированного сигнала без относительно того, есть в нем "опасные" всплески или нет.

Ко второй группе можно отнести потоковые регулярные методы перекодирования, предкодирования, перемежения, перестановки как входного потока битов, так и отсчетов "спектра", формируемого перед операцией обратного преобразования Фурье. Такие методы рассматривают входной поток битов и сформированный сигнал, как чисто случайные процессы и гарантированно в среднем снижают вероятность появления всплесков.

Третья группа методов исходит из того, что действительно случайному текущему сочетанию битов на входе модулятора будет соответствовать совершенно детерминированный сигнал на его выходе. Его пик-фактор можно оценить. Если он нас не устраивает, текущее сочетание входных битов, например, исключается из передачи. Как рафинированный пример такого подхода в [5] предлагается заранее просчитать все возможные формы сигнала под все возможные сочетания входного потока битов. Выявить "опасные" сочетания, запомнить их и затем по той или иной схеме избегать их прямой передачи. Вычислительная сложность такого

одноразового подхода, особенно для систем с небольшим количеством поднесущих типа Wi-Fi, NB-IoT, LTE-MTC и др., не является сдерживающим обстоятельством. Затратными оказываются способы передачи – а их надо передать – выявленных "опасных" сочетаний.

С ориентацией на методы третьей группы попытаемся оценить вычислительную сложность предсказания наличия в символе сигнала с OFDM экстремального всплеска, когда достигается максимально возможное значение амплитуды такого сигнала.

В простейшем случае на длительности одного символа T сигнал OFDM может быть представлен суммой гармонических поднесущих

$$S(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sin((\omega_0 + n\Delta\omega)t + \varphi_n), \tag{1}$$

где ω_0 – начальная круговая частота ряда поднесущих; $\Delta\omega$ – разнос по частоте (круговой) между поднесущими; φ_n – начальная фаза поднесущей; $t \in [0, T]$ – текущее время; N – количество поднесущих в сигнале.

Функция текущей фазы для каждой из поднесущих с учетом их ортогональности может быть записана в виде

$$\Phi_n(t) = (\omega_0 + n\Delta\omega)t + \varphi_n = \left(2\pi \frac{m}{T} + 2\pi \frac{n}{T} \right) t + \varphi_n = 2\pi \frac{(m+n)}{T} t + \varphi_n, \tag{2}$$

где m – количество периодов начальной поднесущей на длине символа T (обычно – целое число); $n \in [0, (N-1)]$ – номер поднесущей в ряду; $t \in [0, T]$ – текущее время.

В соответствии с выражением для текущей фазы поднесущей (2) на рис. 1 показано поведение этих функций на длительности T символа OFDM для трех соседних поднесущих. Для упрощения все три поднесущие имели нулевую начальную фазу, поэтому их графики стартуют в точке начала координат. По вертикальной оси графиков отложены значения в долях от π радиан. Другими словами, значение 0,5 соответствует фазе $\pi/2$ и так далее.

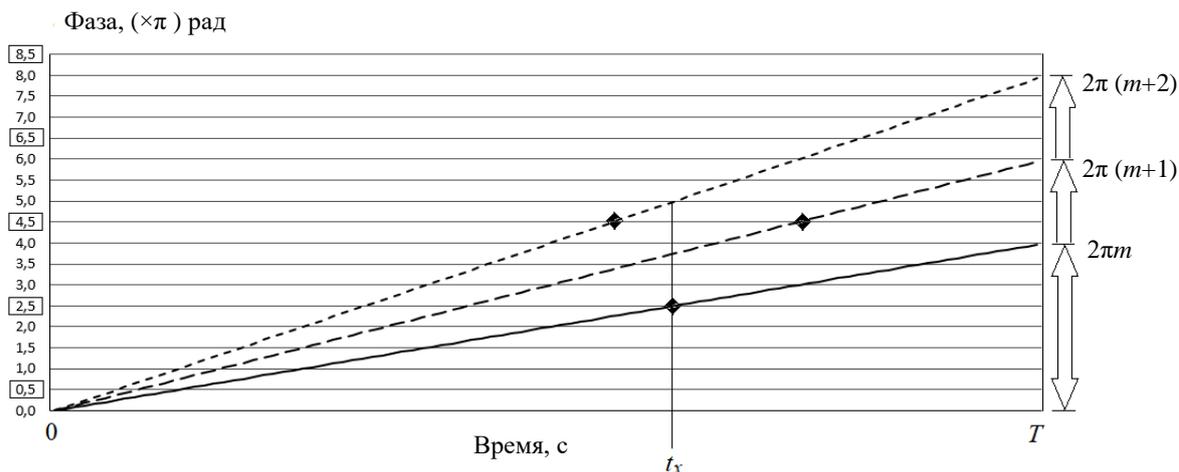


Рис. 1. Поведение текущей фазы для трех гармонических поднесущих на длине символа OFDM

На конце длительности символа T линейная функция для самой низкочастотной поднесущей достигает значения $2\pi m$. Свойство ортогональности поднесущих предполагает, что во временной области всякая следующая поднесущая имеет ровно на один период больше своих колебаний, чем предыдущая [6]. Это означает, что график следующей по порядку поднесущей должен достигать значения на 2π больше, чем график фазы предыдущей поднесущей, как это и показано на рис. 1.

При модуляции поднесущая будет иметь некоторую начальную фазу в интервале от 0 до 2π . В этом случае ее линейный график смещается вверх на указанное значение начальной фазы параллельно самому себе относительно положения на рис. 1.

В предлагаемом графическом представлении все поднесущие будут достигать, например, локального положительного амплитудного значения в моменты времени, когда их текущие фазы пересекают значения вертикальной сетки со значениями 0,5, 2,5, 4,5 и т.д., как показано на рис. 1. Понятно, что сигнал OFDM достигнет экстремального всплеска только в случае, если в некоторый момент времени t_x все поднесущие просуммируются точно в фазе своих локальных амплитудных значений. На графиках рис. 1 это будет соответствовать ситуации, когда в момент t_x все линейные функции текущей фазы будут иметь значения 0,5, либо 2,5, либо 4,5 и т.д. Другими словами, вертикальная линия при аргументе t_x будет пересекать все линейные функции только в указанных значениях фазы.

На рис. 1 представлен прямо противоположный случай. В момент t_x значения 2,5, обозначенного маркером, достигает первая поднесущая в структуре сигнала. Однако две другие поднесущие имеют требуемые для формирования экстремального всплеска фазы (4,5 на графиках) совершенно в другие моменты времени.

Понятно, что формирование экстремального всплеска с отрицательным знаком будет происходить при аналогичных условиях, но для значений текущих фаз из ряда 1,5, 3,5, 5,5 и т.д.

Алгоритм выявления экстремального всплеска

На основе сказанного выше может быть записана система из N уравнений следующего вида, определяющая наличие экстремального положительного всплеска

$$2\pi \frac{(m+n)}{T} t_k^n + \varphi_n = \frac{\pi}{2} + 2\pi k, \quad (3)$$

где $k \in [0, (m+n)]$ – порядковый номер периода поднесущей, где отыскивается всплеск; $n \in [0, (N-1)]$ – номер поднесущей в ряду; t_k^n – момент времени достижения положительного амплитудного значения текущей поднесущей n в ее периоде k .

Разрешение такой системы в общем виде не требуется. Может быть использован упрощенный алгоритм. Для поднесущей с $n=0$, имеющей наименьшее количество периодов на длине символа, определяется момент времени достижения ею первого амплитудного значения t_1^0 . Это значение подставляется в уравнение (3) для $n=1$ и проверяется его непротиворечивость с перебором всех k . Если при каком-либо k присутствует непротиворечивость, то повторяем проверку для следующего $n=2$ и т.д. Если уравнение противоречиво (не может быть разрешено), то отбрасываем момент времени t_1^0 и переходим к моменту t_2^0 . Для этого значения повторяем проверки. Такой алгоритм вытекает из условия, что все поднесущие должны достигать локального амплитудного значения в один и тот-же момент времени для формирования общего экстремального всплеска в сигнале.

Из уравнения (3) видно, что при значении времени $t_k^n = 0$ пропадает зависимость от номера поднесущей и для всех поднесущих при $k=0$ получается взаимно не противоречивая система из уравнений вида

$$\varphi_n = \frac{\pi}{2}, \quad (4)$$

где $n \in [0, (N-1)]$.

Другими словами, экстремальный всплеск будет сформирован в первой же точке сигнала, т.к. все поднесущие начинаются с амплитудного значения (начальная фаза $\pi/2$).

Аналогично, при $t_k^n = T$ уравнения в системе приобретут вид

$$2\pi(m+n) + \varphi_n = 2\pi k + \frac{\pi}{2}, \quad (5)$$

что при той же начальной фазе всех поднесущих $\varphi_n = \frac{\pi}{2}$ и $k = (m+n)$ обеспечит экстремальный всплеск в последней точке сигнала.

Описанной частной ситуации с одинаковыми для всех поднесущих начальными фазами $\pi/2$ будет соответствовать семейство графиков, показанное на рис. 2. На графиках можно видеть, что колебания достигают требуемых значений фаз, кратных $\pi/2$ и обозначенных маркерами, в одинаковые моменты времени.

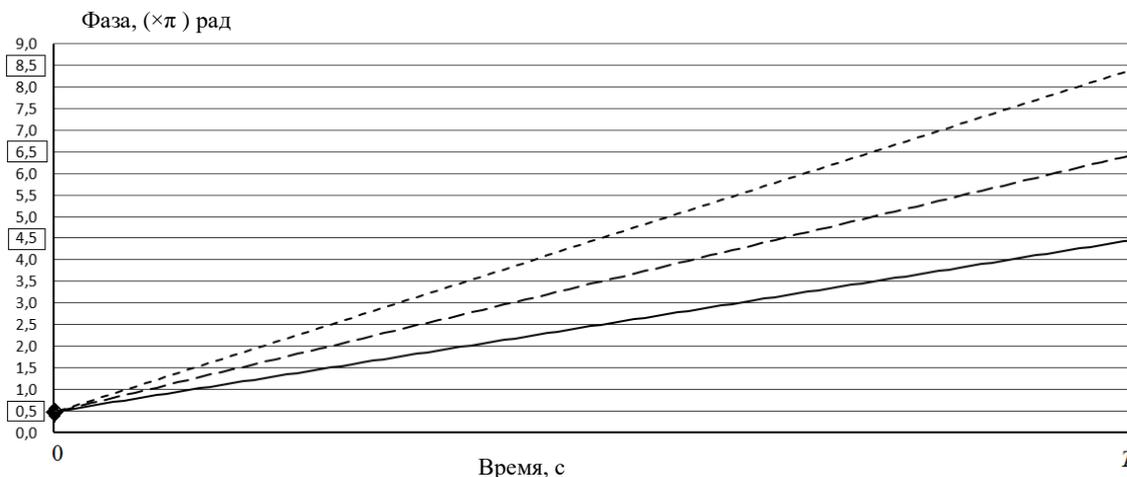


Рис. 2. Текущая фаза для трех гармонических поднесущих при их начальных фазах $\pi/2$

Данный метод наиболее подходит для сигналов OFDM с небольшим количеством поднесущих, например, как упомянутый выше узкополосный интернет вещей NB-IoT, где при передаче в DL имеется только 12 поднесущих в полосе 180 кГц. Даже при небольшом количестве поднесущих, пик-фактор такого сигнала, понимаемый как PAPR (англ. Peak-to-Average Power Ratio), достигает при наличии экстремального всплеска относительно большого значения [7]

$$PAPR = 10\lg(N) = 10\lg(12) = 10,8 \text{ (дБ)}. \quad (6)$$

При использовании протокола передачи с возможными повторениями до 2048 раз, неудачная по пиковой структуре реализация сигнала может оказаться опасной для выходных каскадов передатчика и антенно-фидерного устройства.

Обычно сигналы с OFDM формируют на так называемой "нулевой частоте", когда середина спектра ОБПФ соответствует нулю герц. В случае NB-IoT это полоса ± 90 Гц. Далее сигнал переносится в смесителе на среднюю частоту выбранного радиоканала. При это временная структура огибающей сигнала сохраняется. Понятно, что описанный метод целесообразно применять именно на "нулевой частоте", что существенно минимизирует количество переборов по коэффициенту k .

Заключение

Представленный метод прогнозирования экстремальных всплесков, ориентированный на использование в NB-IoT, может оказаться простым инструментом для повышения эффективности передачи подобных систем и снижения требований, соответственно, и стоимости выходных каскадов радиоборудования.

EXTREMAL PULSE FORECASTING IN THE SIGNAL WITH OFDM

V.A. AKSYONOV, S.V. SMOLYAK

Abstract. On the basis of the determinism of the signal generation algorithm with OFDM, a method is considered for calculating the time point on the symbol duration, where an extreme in magnitude, or close to it, burst in the signal structure can be formed. This method is considered as part of a group of more general methods for reducing the crest factor of an OFDM signal without introducing distortion. The simplest seems to be the application of the proposed approach to the formation of a radio block of the narrowband Internet of things NB-IoT, where there are only 12 subcarriers.

Keywords: OFDM, crest factor, PARP, orthogonal subcarriers, current phase, extremal pulse, radio block NB-IoT.

Список литературы

1. ITU-T Technical Report FG-NET2030-Sub-G1(2020). Representative use cases and key network requirements for Network 2030. [Электронный ресурс]. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/fg/T-FG-NET2030-2020-SUB.G1-PDF-E.pdf
2. Sandeep Bhada, Pankaj Gulhaneb, A.S. Hiwalec. PAPR reduction scheme for OFDM. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017312002940/pdf?md5=218c5c472db45e3b38ec5119000507c7&pid=1-s2.0-S2212017312002940-main.pdf>.
3. Пик-фактор OFDM модулированного сигнала. [Электронный ресурс]. URL: https://bester-ltd.ru/articl/teoriya_praktika/pik_faktor_ofdm_modulyacii/pik_faktor_ofdm_modulyacii.html
4. Zaidi A., Athley F., Medbo J. [et. al] Physical Layer. Principles, Models and Technology Components. 2018, P. 159–198.
5. Рухлин С.Н. // III Всероссийские Армандовские чтения. 2013. С. 201–207.
6. Передача сигналов ДЗЗ по технологии OFDM. Тема 5. Лекция № 15. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.its.kpi.ua/subjects/22/Documents/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%2015.pdf>
7. Sadek Ali, Yu Li, Khalid Hossain Jewel [et. al]. // Channel Estimation and Peak-to-Average Power Ratio Analysis of Narrowband Internet of Things Uplink Systems. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/2570165>.