РАДИОТЕХНИКА, РАДИОЛОКАЦИЯ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 621.376; 621.391.82

ДВУХКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ OFDM-СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

А. А. Лисничук, к.т.н., доцент кафедры РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-6562-6942, e-mail: a.a.lisnichuk@gmail.com
А. В. Батищев, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-6142-1170, e-mail: anrusba@ya.ru

Перегруженность спектрального ресурса (приводящая к требованиям увеличения помехоустойчивости для минимизации действия мешающих факторов) и высокое значение пик-фактора (из которого проистекает низкая энергетическая эффективность) в современных радиосистемах передачи информации (РСПИ) на основе OFDM-сигналов делает актуальной задачу совместного преодоления обозначенных недостатков. ***Целью работы*** *является двухкритериальный синтез OFDM-сигнала для повышения энергетической эффективности и устойчивости РСПИ к действию сосредоточенных по спектру помех. На практике широко распространено мешающее воздействие в виде совокупности АБГШ и полосовой помехи. В таких условиях выигрыш по пик-фактору синтезированного OFDM-сигнала относительно известного (по уровню дополнительной функции распределения 10^{-3}) составляет порядка 4 дБ, а вероятность битовой ошибки (при фиксированном значении E_b/N_0=14 дБ) снижается с $2{,}5\cdot10^{-2}$ до $1{,}3\cdot10^{-5}$ (отношение сигнал-помеха = 9 дБ).*

Ключевые слова: *OFDM; энергоэффективность; помехоустойчивость; многокритериальный синтез; пик-фактор; резервация тонов.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-76-3-14

Введение

Развитие радиосистем передачи информации (РСПИ) и увеличение их количества привело к нехватке спектрального ресурса [1]. Данный дефицит, в свою очередь, приводит к ухудшению помеховой обстановки, поскольку на практике имеет место использование одного и того же спектрального ресурса различными коммуникационными устройствами [2, 3]. Этот факт приводит к возникновению помех, в том числе и сосредоточенных по спектру, влияние которых необходимо минимизировать. Следовательно, целесообразно производить повышение помехоустойчивости РСПИ к действию таких мешающих факторов.

При этом широкое распространение получила технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM). Данная технология используется в таких стандартах связи, как LTE, Wi-Fi, DVB-T2 и др. OFDM-сигналы обладают рядом преимуществ: 1) способностью противостоять сосредоточенному по спектру мешающему воздействию в радиоканале (в том числе за счет адаптивной программной конфигурации параметров радиосистемы на поднесущих); 2) высокой спектральной эффективностью и т.д. Однако данным сигналам присущи и некоторые недостатки, наиболее существенным из которых является высокое значение пик-фактора, приводящее к низкой энергоэффективности радиосистемы. Для устранения данного недостатка на практике реализуют как применение OFDM-сигналов только в нисходящей линии связи (в LTE) [4], так и использование специальных методов снижения величины пик-фактора OFDM-сигналов.

При этом актуальной становится задача разработки подхода для совместного преодоления обозначенных выше недостатков радиосистем для класса OFDM-сигналов. Многокритериальный подход обеспечивает возможность учета наиболее значимых показателей качества [5]. Следовательно, целесообразно исследовать вопрос многокритериального синтеза OFDM-сигналов для повышения энергоэффективности и помехоустойчивости РСПИ.

Энергоэффективность и помехоустойчивость OFDM-сигнала РСПИ

При разработке и эксплуатации РСПИ актуальными являются задачи увеличения энергоэффективности и помехоустойчивости. Данные параметры влияют как на продолжительность функционирования РСПИ от автономных источников питания, так и на качество связи при воздействии на сигнал мешающих факторов. Рассмотрим вначале энергоэффективность РСПИ на основе OFDM-сигналов. В таких системах одним из способов достижения высокой энергоэффективности является уменьшение величины пик-фактора [6-8].

Пик-фактор – это отношение пиковой мощности сигнала к средней [8]:

$$PAPR = 10 \cdot \lg \frac{\max\left[x(t) \cdot x^*(t) \right]}{E\left[x(t) \cdot x^*(t) \right]}, \quad (1)$$

где $PAPR$, дБ – пик-фактор; $x(t)$ – реализация OFDM-сигнала по времени; $(\cdot)^*$ – комплексное сопряжение; $E[\cdot]$ – оператор математического ожидания.

Очевидно, что большие значения пик-фактора приводят к требованию работы усилителей мощности РСПИ в линейном режиме для минимизации искажений, что, в свою очередь, снижает КПД [8, 9].

Для OFDM-сигналов характерны высокие значения величины пик-фактора, которые возникают вследствие синфазного сложения колебаний на поднесущих OFDM-сигнала. Предполагая, что $E\left[|s(t)|^2 \right] = 1$, здесь $s(t)$ – узкополосный сигнал, а N_S – количество поднесущих OFDM-сигнала, получаем, что максимальное значение величины пик-фактора будет равно количеству поднесущих OFDM-сигнала. Кроме того, данный показатель будет иметь вероятностный характер, т.е. $PAPR \to N_S$ [8].

При этом необходимо учитывать, что появление реализации OFDM-сигнала с максимальной мощностью носит вероятностный характер и уменьшается с увеличением количества поднесущих OFDM-сигнала N_S [8, 10]. Для вероятностной оценки величины пик-фактора используют дополнительную функцию распределения от порогового значения – $CCDF(PAPR_0)$, показывающую, с какой вероятностью искомая величина превышает заданный порог:

$$CCDF(PAPR_0) = p(PAPR > PAPR_0), \quad (2)$$

где $PAPR_0$ – пороговое значения пик-фактора.

Расчет теоретической зависимости $CCDF(PAPR_0)$ для OFDM-сигнала с количеством поднесущих, равным N_S, производится в соответствии с формулой [8]:

$$CCDF(PAPR_0) = 1 - \left[1 - \exp\left(-PAPR_0{}^2 \right) \right]^{N_S}. \quad (3)$$

Следовательно, для адекватного описания характеристик энергоэффективности целесообразно использовать критерий качества в виде дополнительной функции распределения от порогового значения, т.е. $CCDF(PAPR_0)$.

Далее рассмотрим помехоустойчивость РСПИ на основе OFDM-сигналов.

Под помехоустойчивостью РСПИ понимают способность РСПИ противостоять мешающему воздействию [11]. Как было отмечено ранее, рост числа РСПИ приводит к дефициту спектрального ресурса [1], что в свою очередь ухудшает помеховую обстановку. Ввиду этого актуальной становится задача повышения помехоустойчивости разрабатываемых РСПИ, в том

числе и радиосистем на основе OFDM-сигналов. В таких системах для минимизации действия сосредоточенных по спектру помех применяют [12-14]: режекторные фильтры; оконные функции; предварительное кодирование; эквалайзеры.

При этом в цифровых системах связи в качестве количественной меры определения помехоустойчивости РСПИ выступает зависимость вероятности возникновения битовых ошибок от отношения энергии сигнала, приходящейся на один бит принимаемого сообщения к энергетической спектральной плотности шума, т.е. $BER(E_b / N_0)$.

В качестве показателя качества помехоустойчивости РСПИ можно использование вероятность возникновения битовых ошибок, т.е. $BER(E_b / N_0)$.

Совместное повышение энергоэффективности и помехоустойчивости систем передачи информации

Наиболее простым способом повышения помехоустойчивости РСПИ, применительно к OFDM-системам передачи информации, является исключение передачи данных на поднесущих OFDM-сигнала, подверженных влиянию мешающего воздействия. Анализ известных методов снижения величины пик-фактора [15] в интересах достижения данной задачи позволяет выделить метод резервации тонов. Этот метод использует часть поднесущих OFDM-сигнала (зарезервированные поднесущие), на которых синтезируются специальные колебания для дальнейшего суммирования с полезным OFDM-сигналом в интересах минимизации пиковых выбросов в огибающей, что и приводит к снижению величины пик-фактора. Необходимо иметь в виду, что передача полезной информации на зарезервированных поднесущих отсутствует – полезный сигнал в области данных поднесущих перед мультиплексированием принимает нулевые значения [15-19]:

$$n_{DATA} \in N, \quad |N| = N_S, \quad n_{RS} \in N, \quad n_{DATA} \cap n_{RS} = \varnothing,$$

где n_{DATA} – множество поднесущих OFDM-сигнала, в которых происходит передача данных; N – здесь множество всех поднесущих OFDM-сигнала; n_{RS} – множество зарезервированных поднесущих OFDM-сигнала; $|\cdot|$ – мощность множества (количество уникальных элементов множества, в данном случае количество поднесущих); $\varnothing$ – пустое множество. Более детально метод резервации тонов описан в [16, 17].

Управление размещением зарезервированных поднесущих OFDM-сигнала позволяет расположить их в области действия на OFDM-сигнал мешающего воздействия, что одновременно приводит к повышению энергоэффективности и помехоустойчивости.

Двухкритериальный синтез OFDM-сигналов

Многокритериальный синтез OFDM-сигналов на основе взвешенной суммы

Поскольку эффективность работы метода резервации тонов зависит от размещения соответствующих поднесущих в полосе частот OFDM-сигнала [20], то актуальна задача выбора местоположения зарезервированных поднесущих для минимизации величины пик-фактора. С другой стороны, зарезервированные тона целесообразно размещать на тех поднесущих, на которые действуют помехи в интересах минимизации эффекта от последних. Для решения таких задач при разработке сложных систем целесообразно использование многокритериального подхода, который удобно осуществлять на основе взвешенной суммы [5]:

$$J_p = \sum_{d=1}^{D} c_d M_d K_d, \quad \sum_{d=1}^{D} c_d = 1, \quad M_d > 0, \tag{4}$$

где J_p – целевая функция; c_d, M_d – соответственно весовые и масштабирующие коэффициенты для каждого входящего критерия качества K_d; D – количество критериев качества.

Тогда для синтеза радиосигналов в целях совместного повышения энергоэффективности и помехоустойчивости РСПИ формула (4) примет вид:

$$J_p(n_{RS}) = cM_1K_1(n_{RS}) + (1-c)M_2K_2(n_{RS}), \quad (5)$$

где $K_1(n_{RS})$ – критерий максимума энергоэффективности OFDM-сигналов; $K_2(n_{RS})$ – критерий максимума помехоустойчивости.

Критерий максимума энергоэффективности OFDM-сигналов

Ранее отмечено, что для увеличения энергоэффективности необходимо уменьшить величину пик-фактора OFDM-сигнала. Тогда критерий максимума энергоэффективности OFDM-сигналов K_1 можно записать в следующем виде:

$$K_1(n_{RS}) = \frac{C(n_{RS},h)}{C_0(h)} \to \min, \ 0 \le K_1(n_{RS}) \le 1, \quad (6)$$

где $C(n_{RS},h)$ – величина порога пик-фактора, т.е. значение $PAPR_0$, при котором достигалась значение дополнительной функции распределения $CCDF(PAPR_0)$, равное 10^h, $C_0(h)$ – теоретическое значение величины порога пик-фактора, т.е. значение $PAPR_0$, при котором достигалась значение дополнительной функции распределения $CCDF(PAPR_0)$, равное 10^h, для известного OFDM-сигнала (без применения методов снижения пик-фактора), см. (3). Для каждого значения порога пик-фактора накапливалось не менее 10^3 превышений пик-фактором порогового значения, т.е. $p(PAPR > PAPR_0)$. Выражение $1/C_0(h)$ представляет собой масштабирующий коэффициент, такой что $C(n_{RS},h) \le C_0(h)$, тогда критерий максимума энергоэффективности OFDM-сигналов лежит в следующих пределах: $0 \le K_1(n_{RS}) \le 1$.

Определение $C(n_{RS},h)$ схематично показано на рисунке 1

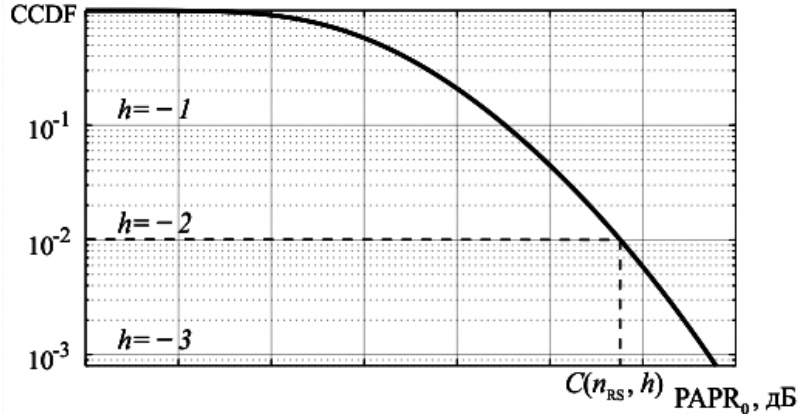

Рисунок 1 – Пример зависимости CCDF($PAPR_0$)
Figure 1 – Example CCDF($PAPR_0$)-dependency

На рисунке 1 приведен пример зависимости $CCDF(PAPR_0)$. Также схематично показана величина параметра $C(n_{RS},h)$ при $n_{RS} = \varnothing$, $h = -2$ (в качестве примера).

Выбор параметра h имеет компромиссный характер, поскольку оказывает влияние: 1) на время расчета оптимального размещения зарезервированных тонов; 2) применимость на практике полученных значений, поскольку этот параметр тем ценнее, чем сильнее снижается пик-фактор при как можно меньшей вероятности $p(PAPR > PAPR_0)$. Для экспериментальных исследований решено использовать следующее значение коэффициента: $h = -3$.

Критерий максимума помехоустойчивости

В [21] показано, что для максимизации пропускной способности канала РСПИ при наличии мешающего воздействия необходимо выполнение следующего условия:

$$\frac{1}{R(f)+P(f)} + \lambda = 0, \ \lambda = const, \ \lambda < 0 \quad (7)$$

где $P(f)$ – полная мощность передатчика, распределенная по спектру; $R(f)$ – спектральная плотность мощности (СПМ) мешающего воздействия, т.е. для увеличения пропускной способности необходимо выполнение следующего условия: если на частотах, на которых мощность шума мала, мощность сигнала должна быть велика, и наоборот.

Ранее отмечено, что в зарезервированных поднесущих n_{RS} отсутствует передача информации. Это позволяет производить отбрасывание на приемной стороне сигнала, принятого на этих поднесущих, поскольку он служит только для снижения величины пик-фактора на передающей стороне. Тогда размещение зарезервированных поднесущих n_{RS} на частотах OFDM-сигнала, подверженных влиянию мешающего воздействия, приводит к увеличению помехоустойчивости РСПИ [21]. Следовательно, критерий максимума помехоустойчивости $K_2(n_{RS})$ можно записать в следующем виде:

$$K_2(n_{RS}) = \frac{\left\| R_H(N) - n_{RS}(N) \cdot R_H(N) \right\|}{\left\| R_H(N) \right\|} \to \min,\ 0 \le K_2(n_{RS}) \le 1, \qquad (8)$$

где $R_H(N)$ – нормированная СПМ мешающего воздействия от номера поднесущей OFDM-сигнала (характеризует требуемое расположение зарезервированных тонов для повышения помехоустойчивости), $n_{RS}(N) \cdot R_H(N)$ – выражение для учета зарезервированных тонов на частотах действия помехи, $\|\cdot\|$ – евклидова норма; $1/\left\| R_H(N) \right\|$ – масштабирующий коэффициент.

Алгоритм оптимизации

Значительным недостатком метода резервации тонов является некоторая зависимость величины пик-фактора от количества зарезервированных тонов и их размещения в полосе частот OFDM-сигнала [20]. Суммарно, для OFDM-сигнала со 128 поднесущими, из которых для алгоритма резервации тонов выделено 20 % (26 тонов), число возможных сочетаний выбора зарезервированных тонов составляет: $C_{128}^{26} \approx 9{,}95 \cdot 10^{26}$. Ввиду большого количества возможных сочетаний размещения зарезервированных тонов, определение оптимального множества зарезервированных тонов методом Монте-Карло затруднено, т.е. имеет место задача определения оптимального размещения зарезервированных поднесущих.

Отметим, что задача оптимизации имеет дискретный характер из-за алфавита аргументов целевой функции (5). Тогда для решения задачи оптимизации целесообразно рассмотреть представителей класса дискретных алгоритмов оптимизации: 1) генетический алгоритм; 2) модифицированный метод покоординатного спуска; 3) комбинированный метод. На данные оптимизационные методы дополнительно накладываются ограничения в виде: целочисленности, уникальности элементов множества n_{RS}, а также $|n_{RS}| = const$ (количество зарезервированных поднесущих OFDM-сигнала не должно изменяться).

Генетические алгоритмы оптимизации могут учитывать произвольные линейные и нелинейные ограничения. Однако не гарантируют того, что обнаруженный экстремум является глобальным. Достоинством генетических алгоритмов является то, что они могут применяться для решения сложных неформализованных задач.

Метод покоординатного спуска относится к методам нулевого порядка, т.е. обеспечивает прямой поиск экстремума без вычисления производных целевой функции. Следовательно, он может быть применен к негладким и разрывным целевым функциям.

На рисунке 2 представлен модифицированный метод покоординатного спуска. Данный метод отличается от классического метода покоординатного спуска тем, что соблюдается условие $|n_X| = |n_{RS}| = const$, где n_X – промежуточное множество зарезервированных поднесущих OFDM-сигнала n_{RS}. Данное условие приводит к выполнению наложенных ранее ограничений на множество n_{RS}.

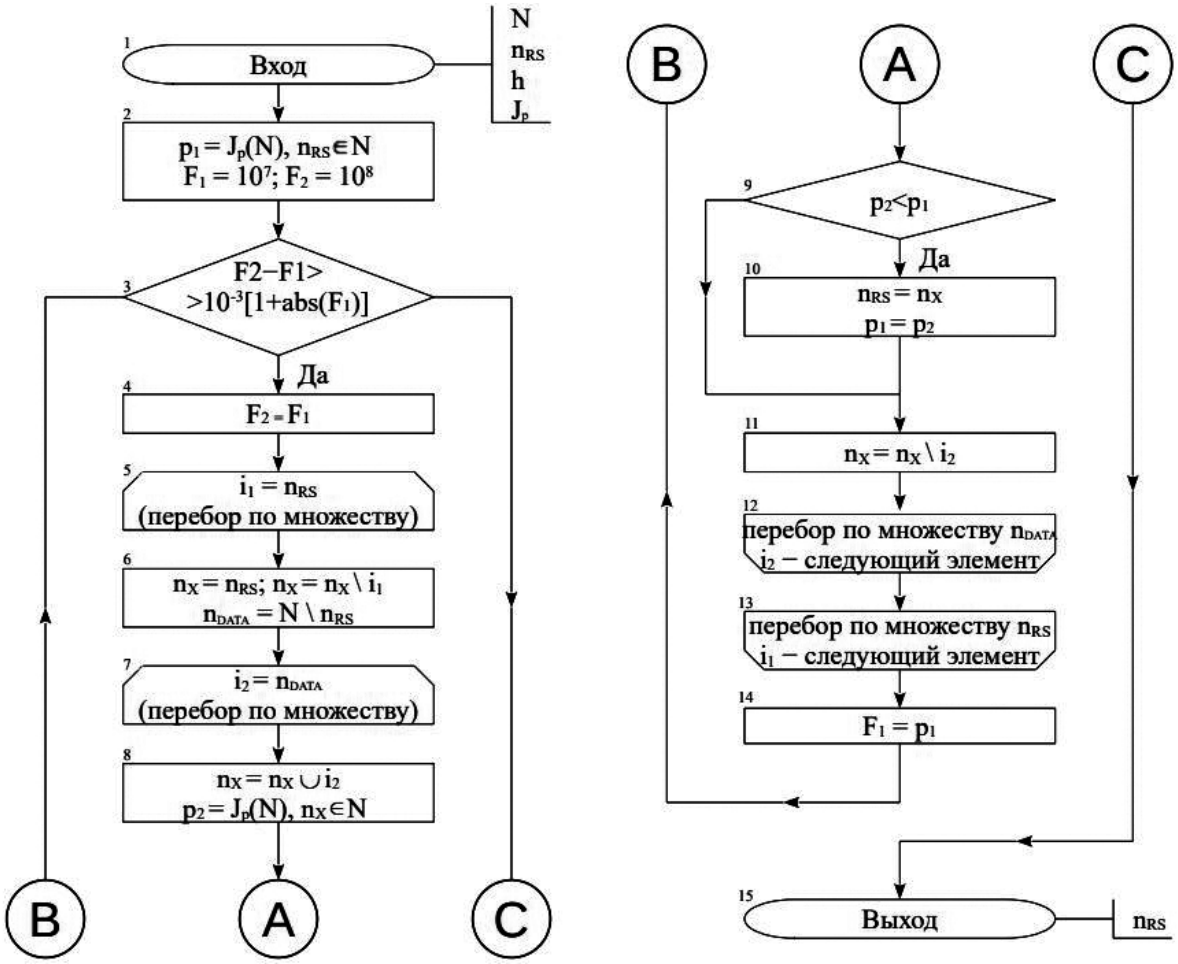

Рисунок 2 – Алгоритм оптимизации, основанный на методе покоординатного спуска
Figure 2 – Optimization algorithm based on the Coordinate Descent Method

Блок 2 производит вычисление начального значения целевой функции $p_1 = J_p(N)$, $n_{RS} \in N$ и определение пороговых коэффициентов критерия останова F_1 и F_2. В блоке 3 производится проверка выполнения критерия останова алгоритма оптимизации. Если условие в блоке 3 истинно, то алгоритм продолжает работу, если нет, то выходим из программы. В блоке 4 производится переопределение порогового коэффициента критерия останова F_2. В блоках с 5 по 13 осуществляется выполнение цикла в виде перебора поднесущих из множества зарезервированных поднесущих OFDM-сигнала n_{RS}. В блоке 6 определяем множество n_X и изымаем из него поднесущую i_1, производим определение множества поднесущих OFDM-сигнала, в которых происходит передача данных n_{DATA}. Затем в блоках с 7 по 12 производим перебор по поднесущим i_2. Блок 8 отвечает 1) за дополнение промежуточного набора зарезервированных поднесущих OFDM-сигнала n_X поднесущей i_2; 2) вычисление $p_2 = J_p(N)$, $n_X \in N$. Изъятие из промежуточного набора зарезервированных поднесущих OFDM-сигнала n_X поднесущей i_1 (блок 6) и дальнейшее дополнение поднесущей i_2 (блок 8) приводит к соблюдению условия $|n_X| = |n_{RS}| = const$. В блоках 9 и 10 производим проверку: является ли n_X лучшим набором, при котором целевая функция имеет минимальное значение на данной итерации цикла. Если да, то считаем, что $n_{RS} = n_X$. Для дальнейшего осуществления перебора по поднесущим i_2 в блоке 11 изымаем из n_X поднесущую. В блоке 14 производим переопределение F_1.

Комбинированный метод представляет собой последовательную оптимизацию вначале генетическим алгоритмом для определения области глобального оптимума и затем методом покоординатного спуска в интересах вычисления предполагаемой точки минимума.

Экспериментальные исследования

Без потери общности в качестве примера выбран OFDM-сигнал со 128 поднесущими: $N_S = |N| = 128$, $N = \overline{1;128}$. Для модуляции поднесущих использован сигнал с 16-QAM. Для метода резервации тонов отведено 26 шт. поднесущих: $|n_{RS}| = 0,2|N| = 25,6$. Множество поднесуших OFDM-сигнала N принадлежит множеству натуральных чисел, а поскольку $n_{RS} \in N$, то необходимо произвести округление значения в большую сторону, т.е. $|n_{RS}| = 26$. Тогда $n_{DATA} = N - n_{RS}$, $|n_{DATA}| = |N| - |n_{RS}| = 102$. В качестве целевой функции для синтеза OFDM-сигнала было использовано выражение (5) при $h = -3$. В целях исследования помехоустойчивости OFDM-сигнала в систему введено влияние АБГШ и мешающего воздействия – сосредоточенной по спектру полосовой помехи (ширина СПМ по уровню -30 дБ – 13 поднесущих OFDM-сигнала, отношение сигнал-помеха составляет 9 дБ, см. рисунок 3).

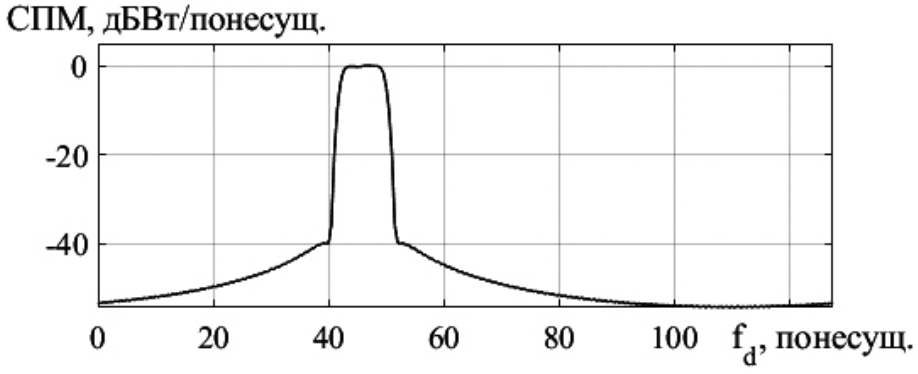

Рисунок 3 – Спектральная плотность мощности полосовой помехи
Figure 3 – Power spectral density of bandpass interference

Здесь $f_d = N_S \cdot f / f_s$ – нормированная к количеству поднесущих OFDM-сигнала частота; f – частота; f_s – частота дискретизации.

В ходе имитационного моделирования целесообразно произвести сравнительный анализ различных полученных наборов зарезервированных поднесущих (см. рисунки 4 и 5) с точки зрения эффективности снижения величины пик-фактора (критерий максимума энергоэффективности OFDM-сигналов).

На рисунке 4 представлены примеры размещения зарезервированных поднесущих OFDM-сигнала n_{RS}, полученных оптимизационными методами: «UNIFORM» – пример набора зарезервированных поднесущих без оптимизации размещения (I); «GA OPT» – пример набора зарезервированных поднесущих, полученный в ходе работы генетического алгоритма (II); «CDM OPT» – пример набора зарезервированных поднесущих, полученный в ходе работы модифицированного метода покоординатного спуска (III); «GA-CDM OPT» – пример набора зарезервированных поднесущих, полученный в ходе работы комбинированного метода оптимизации (IV). Наборы зарезервированных поднесущих OFDM-сигнала под A и под B соответствуют разным входным n_{RS}: A – двухкритериальный синтез OFDM-сигнала при действии на РСПИ полосовой помехи; B – двухкритериальный синтез OFDM-сигнала без наличия мешающего воздействия.

На рисунке 5 приведена зависимость $CCDF(PAPR_0)$ для случаев: «No TR» – для OFDM-сигнала без применения метода резервации тонов (отсутствует снижение величины пик-фактора); «UNIFORM» – для OFDM-сигнала с применением метода резервации тонов, выбор

тонов – равномерный (см. рисунок 4, набор I); «EXPERIMENT» – для синтезированного OFDM-сигнала, размещение тонов производилось с помощью оптимизационных алгоритмов, представленных в работе (см. рисунок 4, наборы II – IV, графики совпадали в пределах доверительных интервалов). Для расчета зависимостей накапливалась статистика в количестве не менее 10^3 превышений ($PAPR > PAPR_0$).

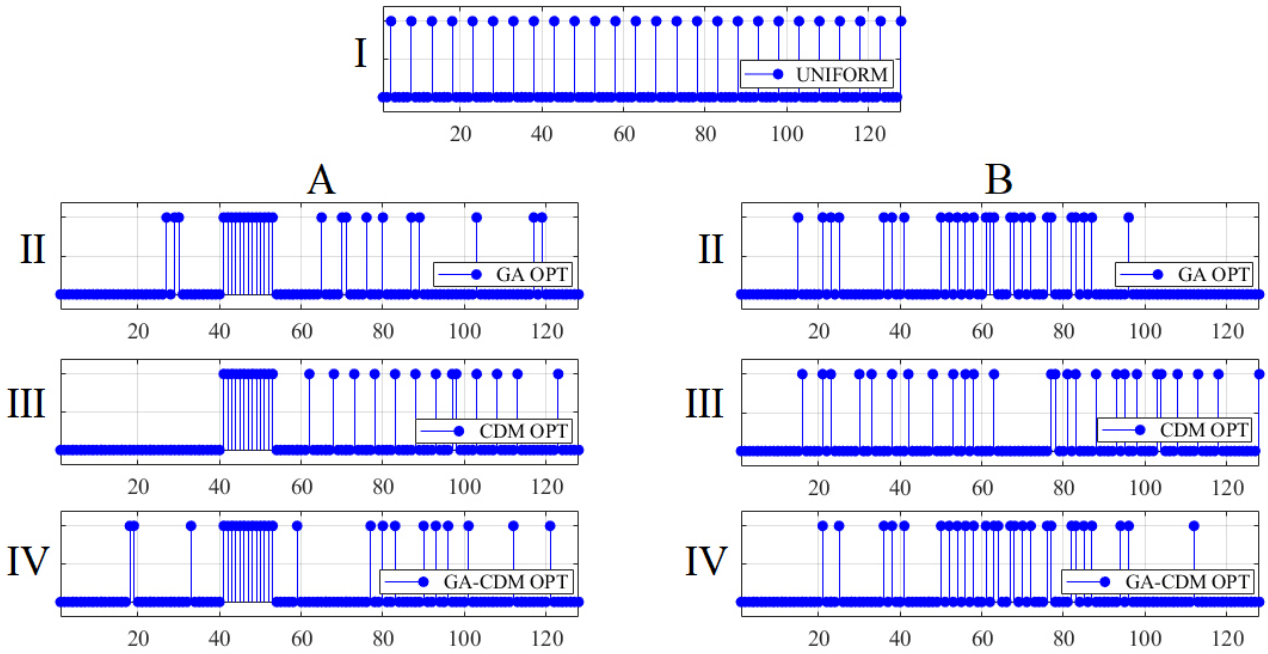

Рисунок 4 – Примеры размещения зарезервированных поднесущих OFDM-сигнала
Figure 4 – Examples of reserved subcarriers placement for OFDM-signal

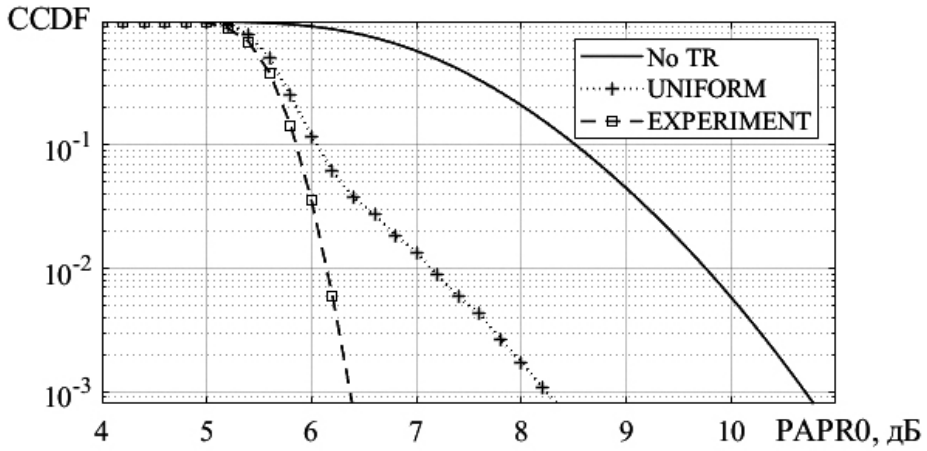

Рисунок 5 – Анализ CCDF($PAPR_0$) для различных наборов зарезервированных тонов
Figure 5 – CCDF($PAPR_0$) analysis for different sets of reserved tones

Из анализа рисунка 5 видно, что от вариации метода оптимизации (среди рассматриваемых) при заданных параметрах значительного изменения выигрыша по пик-фактору не наблюдается. Тогда в качестве алгоритма оптимизации рационально выбрать модифицированный метод покоординатного спуска, поскольку метод прост в реализации.

Выигрыш $CCDF(PAPR_0)$ при размещении тонов оптимизационными алгоритмами относительно известного OFDM-сигнала по уровню 10^{-3} составляет порядка 4,35 дБ.

На рисунке 6 представлены: A – зависимость количества поднесущих OFDM-сигнала, на которые оказывает влияние сосредоточенная по спектру полосовая помеха $N_{RFI}(a)$ от уровня a; B – зависимость $K_1(n_{RS})$ при условии того что $n_{RFI}(a) \in n_{RS}$; C – зависимость

$K_2(n_{RS})$ при условии того, что $n_{RFI}(a) \in n_{RS}$; D – зависимость $K_1(K_2)$ (линия не худших решений) при условии того, что $K_1(n_{RS})$ и $K_2(n_{RS})$ получены для одних и тех же наборов зарезервированных поднесущих n_{RS} при различных a, так чтобы $n_{RFI}(a) \in n_{RS}$.

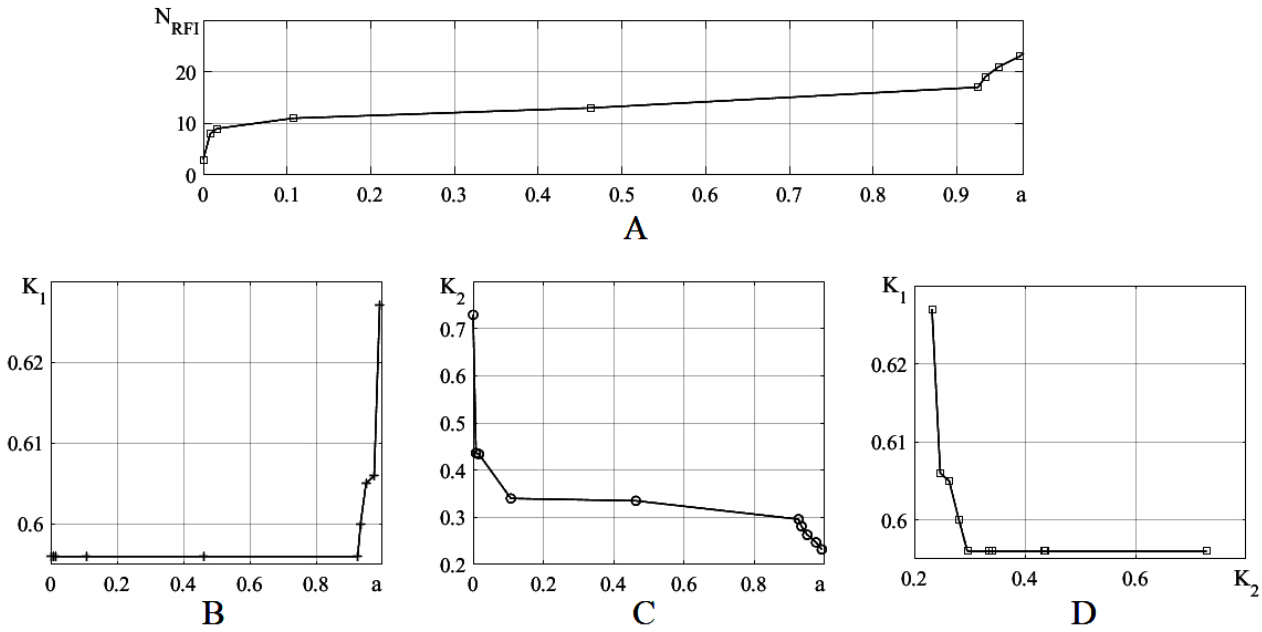

Рисунок 6 – Анализ критериев качества $K_1(n_{RS})$ и $K_2(n_{RS})$
Figure 6 – Analysis of K_1 (n_{RS}) and K_2 (n_{RS}) quality criteria

Здесь $N_{RFI}(a) = |n_{RFI}(a)|$ – количество поднесущих OFDM-сигнала, на которые оказывает влияние сосредоточенная по спектру полосовая помеха; $n_{RFI}(a)$ – оценка множества поднесущих OFDM-сигнала, на которые оказывает влияние сосредоточенная по спектру полосовая помеха согласно уровню $0 \le a \le 1$: $a = 1$ в случае, когда количество поднесущих OFDM-сигнала, на которые оказывает влияние сосредоточенная по спектру полосовая помеха, максимально (для нашего случая, $N_{RFI} = |n_{RS}| = 26$ для этого оценка ширины СПМ помехи осуществляется по уровню -43 дБ); при $a = 0$ пороговый уровень оценки «помеховых поднесущих» $n_{RFI}(a)$ проходит через максимум СПМ помехи. Следует иметь в виду, что если $a = 0$, то оценка количества поднесущих, на которые оказывает влияние полосовая помеха N_{RFI}, даст значение, отличное от нулевого. Это связано с тем, что множество $n_{RFI}(a)$, согласно алгоритму оценки, будет иметь как минимум один элемент, т.е. одну поднесущую, на которую оказывает влияние помеха, следовательно, $N_{RFI}(a) = 0$ при $a < 0$. Поскольку коэффициент a может принимать значения, которые лежат в пределах от нуля до единицы, то возможно его использование в качестве весового коэффициента c.

Из рисунка 6 видно, что увеличение значения параметра a приводит:

1) к росту величины оценки количества поднесущих OFDM-сигнала подверженных влиянию сосредоточенной по спектру полосовой помехи $N_{RFI}(a)$, и как следствие к изменению требований локализации множества зарезервированных поднесущих OFDM-сигнала n_{RS}, поскольку $n_{RFI}(a) \in n_{RS}$;

2) увеличению значения критерия качества $K_1(n_{RS})$: при заданных параметрах РСПИ $K_1(n_{RS}) = 0,6$ при $a = 0$ и $K_1(n_{RS}) = 0,628$ при $a = 0,992$;

3) снижению значения критерия качества $K_2(n_{RS})$: при заданных параметрах РСПИ $K_2(n_{RS}) = 0,729$ при $a = 0$ и $K_2(n_{RS}) = 0,232$ при $a = 0,992$.

Выбор величины параметра a носит компромиссный характер. Видно, что: критерий максимума энергоэффективности OFDM-сигнала $K_1(n_{RS})$ изменяется незначительно – в пределах от 0,6 до 0,628; а критерий максимума помехоустойчивости изменяется в более широких пределах: от 0,232 до 0,729. Целесообразно предположить, что показатель качества максимума энергоэффективности OFDM-сигнала также изменяется незначительно, а показатель качества максимума помехоустойчивости варьируется в большей степени. Тогда целесообразно в качестве компромиссного решения выбрать значение $a = 0,992$ при условии того, что $n_{RFI}(a) \in n_{RS}$. Следовательно:

1) оценка количества поднесущих OFDM-сигнала, на которые оказывает влияние сосредоточенная по спектру полосовая помеха N_{RFI}, составляет 25 поднесущих OFDM-сигнала;

2) значение критерия качества максимума энергоэффективности OFDM-сигнала будет равно $K_1(n_{RS}) = 0,628$;

3) критерий максимума помехоустойчивости будет равен $K_2(n_{RS}) = 0,232$.

Рассмотрим эффективность работы критериев качества $K_1(n_{RS})$ и $K_2(n_{RS})$ на примере показателей качества $CCDF(PAPR_0)$ и $BER(E_b / N_0)$ соответственно.

На рисунке 7 представлены: А – ансамбль характеристик $CCDF(PAPR_0)$ при условии того, что $n_{RFI}(a) \in n_{RS}$ для различных $K_1(n_{RS})$, а также для известного OFDM-сигнала, т.е. без применения методов снижения пик-фактора («No TR»); В – ансамбль характеристик $BER(E_b / N_0)$ при действии полосовой помехи для различных $K_2(n_{RS})$, а также для случая отсутствия помехи («Theoretical»). Для построения характеристики $CCDF(PAPR_0)$ накапливалась статистика в количестве не менее 10^3 превышений порога $PAPR_0$ в каждой точке характеристики, а для построения характеристики $BER(E_b / N_0)$ накапливалась статистика в количестве не менее 10^3 ошибочно принятых бит для каждой точки характеристики. Характеристики $CCDF(PAPR_0)$ и $BER(E_b / N_0)$ получены при ограничении множества зарезервированных поднесущих: $n_{RFI}(a) \in n_{RS}$.

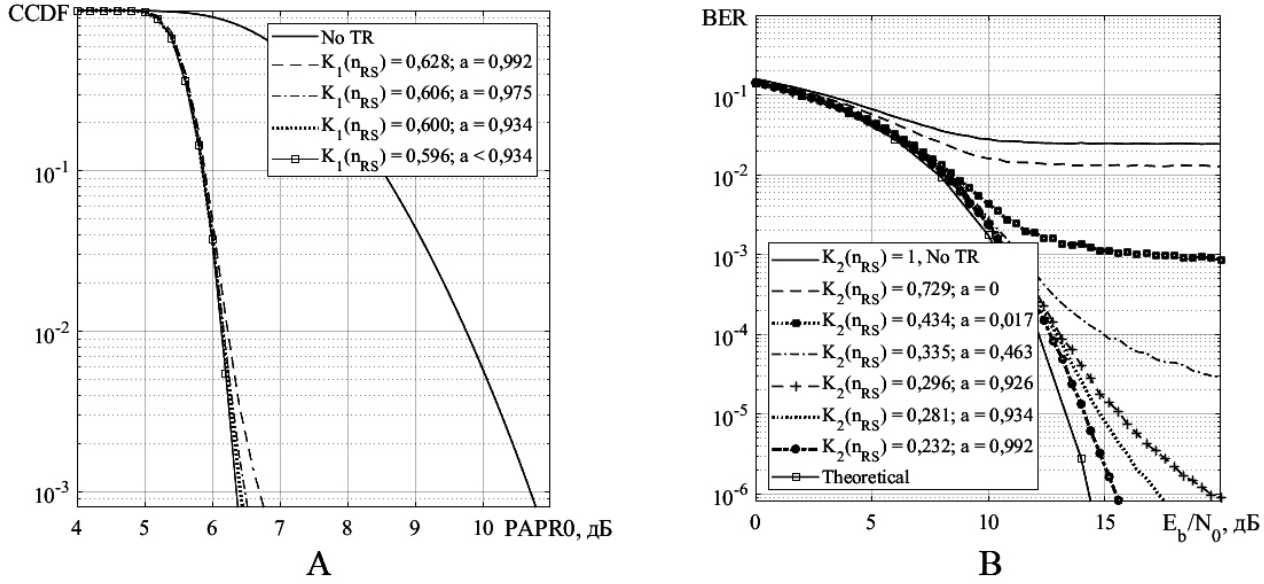

Рисунок 7 – Анализ энергоэффективности и помехоустойчивости синтезированного OFDM-сигнала

Figure 7 – Analysis of energy efficiency and noise immunity for synthesized OFDM-signal

Представленным на рисунке 7 зависимостям $CCDF(PAPR_0)$ и $BER(E_b / N_0)$ соответствуют такие значения критериев качества энергоэффективности $K_1(n_{RS})$ и помехоустойчивости $K_2(n_{RS})$, для которых различно количество «помеховых поднесущих» $n_{RFI}(a)$, т.е. $N_{RFI}(a)$, см. рисунок 6(А). Отметим, что зависимости $K_1(n_{RS}) = 0,596$, $a < 0,934$ рисунка 7(А) соответствует несколько зависимостей на рисунке 7(В), а именно зависимости: 1) $K_2(n_{RS}) = 0,729$, $a = 0$; 2) $K_2(n_{RS}) = 0,434$, $a = 0,017$; 3) $K_2(n_{RS}) = 0,335$, $a = 0,463$; 4) $K_2(n_{RS}) = 0,296$, $a = 0,926$.

Из рисунка 7 видно, что при увеличении $K_1(n_{RS})$ для заданных параметров РСПИ происходит незначительное увеличение пик-фактора, т.е. снижение энергоэффективности:

1) при $K_1(n_{RS}) = 0,628$, $a = 0,992$ получим $C(n_{RS}, -3) = 6,7$ дБ, тогда выигрыш по пик-фактору синтезированного OFDM-сигнала относительно известного OFDM-сигнала по уровню дополнительной функции распределения 10^{-3} составляет порядка 4 дБ;

2) при $K_1(n_{RS}) = 0,596$, $a \le 0,926$ получим $C(n_{RS}, -3) = 6,4$ дБ, тогда выигрыш по пик-фактору синтезированного OFDM-сигнала относительно известного OFDM-сигнала по уровню дополнительной функции распределения 10^{-3} составляет порядка 4,3 дБ [лучшее рассматриваемое значение $CCDF(PAPR_0)$]. Разница между данными выигрышами незначительна и составляет менее 3 %.

Также видно, что при увеличении $K_2(n_{RS})$ ухудшается помехоустойчивость:

1) в случае наличия сосредоточенной по спектру полосовой помехи при $K_2(n_{RS}) = 0,729$, $a = 0$ получим выигрыш по помехоустойчивости синтезированного OFDM-сигнала относительно известного, в виде снижения частоты битовой ошибки с 2,5E-2 до 1,3E-2 при фиксированном значении E_b/N_0, равном 14 дБ;

2) в случае наличия сосредоточенной по спектру полосовой помехи при $K_2(n_{RS}) = 0,232$, $a = 0,992$ получим выигрыш по помехоустойчивости синтезированного OFDM-сигнала относительно известного в виде снижения частоты битовой ошибки с 2,5E-2 до 1,3E-5 при фиксированном значении E_b/N_0, равном 14 дБ. Следовательно, частота битовой ошибки снижает на три порядка, что является существенной разницей в помехоустойчивости.

Из рисунков 6 и 7 видно, что выбранное значение коэффициента $a = 0,992$ приводит:

1) к росту величины критерия качества $K_1(n_{RS})$, т.е. к ухудшению энергоэффективности ввиду деградации дополнительной функции распределения от порогового значения пик-фактора $CCDF(PAPR_0)$ по уровню 10^{-3} на 0,3 дБ относительно лучшего рассматриваемого значения $CCDF(PAPR_0)$, однако в случае сравнения с известным OFDM-сигналом имеет место значительный (до 4 дБ) выигрыш по величине пик-фактора;

2) снижению величины критерия качества $K_2(n_{RS})$ (при наличии мешающего воздействия), т.е. к увеличению помехоустойчивости ввиду снижения частоты битовой ошибки $BER(E_b / N_0)$ на три порядка относительно известного OFDM-сигнала. Очевидно, что концентрирование зарезервированных поднесущих OFDM-сигнала n_{RS} внутри области мешающего воздействия, имеющей большую энергетическую составляющую, приводит к увеличению помехоустойчивости и незначительному снижению энергоэффективности при указанных выше параметрах РСПИ.

Заключение

Разработан и проанализирован подход на основе двухкритериального синтеза OFDM-сигналов для повышения энергетической эффективности и устойчивости радиосистем передачи информации к действию сосредоточенных по спектру помех.

В работе: 1) приведены критерий максимума энергоэффективности OFDM-сигнала и критерий максимума помехоустойчивости; 2) рассмотрен выбор соответствующего алгоритма оптимизации; 3) произведены экспериментальные исследования в виде имитационного моделирования.

В качестве параметров РСПИ рассматривался OFDM-сигнал со 128 поднесущими: $|N| = 128$, $N = \overline{1;128}$. Для модуляции поднесущих использован сигнал с 16-QAM. Для метода резервации тонов отведено 26 шт. поднесущих: $|n_{RS}| = 26$, $n_{DATA} = 102$. В качестве целевой функции для синтеза OFDM-сигнала было использовано выражение (5) при $h = -3$. В целях исследования помехоустойчивости OFDM-сигнала в систему введено влияние АБГШ и мешающего воздействия – сосредоточенной по спектру полосовой помехи (ширина СПМ по уровню -30 дБ – 13 поднесущих OFDM-сигнала, отношение сигнал-помеха составляет 9 дБ).

В ходе работы показано, что выбор метода оптимизации для указанных параметров на величину выигрыша по пик-фактору влияет незначительно. Ввиду этого в качестве алгоритма оптимизации целесообразно выбрать модифицированный метод покоординатного спуска, поскольку: 1) метод прост в реализации; 2) относится к оптимизационным методам нулевого порядка.

Также, рассмотрен двухкритериальный синтез OFDM-сигнала с целью повышения энергетической эффективности и помехоустойчивости. В ходе экспериментальных исследований получено, что при $K_1(n_{RS}) = 0,628$ и $K_2(n_{RS}) = 0,232$ (соответствует $a = 0,992$): 1) оценка количества поднесущих OFDM-сигнала, на которые оказывает влияние сосредоточенная по спектру полосовая помеха N_{RFI}, составляет 25 поднесущих; 2) выигрыш по пик-фактору синтезированного OFDM-сигнала относительно известного по уровню дополнительной функции распределения, равному 10^{-3} составляет порядка 4 дБ; 3) выигрыш по помехоустойчивости синтезированного OFDM-сигнала относительно известного в виде снижения частоты битовой ошибки с 2,5E-2 до 1,3E-5 при фиксированном значении E_b/N_0, равном 14 дБ (отношение сигнал-помеха составляет 9 дБ).

Концентрирование зарезервированных поднесущих OFDM-сигнала n_{RS} внутри области мешающего воздействия, имеющей большую энергетическую составляющую, приводит к увеличению помехоустойчивости и незначительному снижению энергоэффективности, при указанных в работе параметрах РСПИ.

Библиографический список

1. **Weiss T. A., Jondral F. K.** Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency // IEEE communications Magazine. 2004, vol. 42, no. 3, pp. 8-14. DOI: 10.1109/MCOM.2004.1273768.

2. **Liang L., Ye H., Li G. Y.** Spectrum sharing in vehicular networks based on multi-agent reinforcement learning // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2019, vol. 37, no. 10, pp. 2282-2292. DOI: 10.1109/JSAC.2019.2933962.

3. **Zhang L., Liang Y. C., Xiao M.** Spectrum sharing for Internet of Things: A survey // IEEE Wireless Communications. 2018, vol. 26. no. 3. pp. 132-139. DOI: 10.1109/MWC.2018.1800259.

4. LTE [Электронный ресурс]: URL: https://www.3gpp.org/LTE/. Дата обращения: 01.04.2021

5. **Lisnichuk A. A.** DSSS Signals Multi-Criteria Synthesis for Cognitive Radio Systems Adaptation to Complex Interference // 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). IEEE, 2020, pp. 1-5. DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134274.

6. **John G. Proakis, Salehi M.** Digital communications. McGraw-Hill. 2008.

7. **Sklar B. et al.** Digital communications: fundamentals and applications. 2001.

8. **Cho Y. S. et al.** MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. John Wiley & Sons. 2010.

9. **Jang K. et al.** Spectrum characteristics and predistortion gain in the nonlinear high power amplifier (HPA) // 2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). – IEEE. 2017, pp. 931-934. DOI: 10.1109/ICTC.2017.8190817.

10. **Ochiai H., Imai H.** Block coding scheme based on complementary sequences for multicarrier signals // IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. 1997, vol. 80, no. 11, pp. 2136-2143.

11. **Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И. и др.** Помехозащищенности радиосистем со сложными сигналами // Под ред. Г.И. Тузова. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.

12. **Han S. H., Lee J. H.** An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission //IEEE wireless communications. 2005, vol. 12, no. 2, pp. 56-65. DOI: 10.1109/MWC.2005.1421929.

13. **Савинков А. Ю., Прибытков Ю. Н., Маршаков В. К.** Характеристики квазиоптимального алгоритма подавления полосовых помех при приеме сигнала OFDM // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2014. №. 4. С. 45-53.

14. **Coulson A. J.** Bit error rate performance of OFDM in narrowband interference with excision filtering // IEEE transactions on wireless communications. 2006, vol. 5, no. 9, pp. 2484-2492. DOI: 10.1109/TWC.2006.1687772.

15. **Tellado J.** Peak-to-average power reduction for multicarrier modulation // Ph. D. thesis. 1999.

16. DVB-T2 Common Simulation Platform: [Электронный ресурс] // SourceForge URL: http://dvb-t2-csp.sourceforge.net. Дата обращения: 01.04.2021

17. ETSI E. N. 302 755 Digital Video Broadcasting (DVB) // Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). 2012, vol. 1.

18. **Bulusu S. S. K. C. et al.** Quasi-optimal tone reservation PAPR reduction algorithm for next generation broadcasting systems: A performance/complexity/latency tradeoff with testbed implementation //IEEE Transactions on Broadcasting. 2018, vol. 64, no. 4, pp. 883-899. DOI: 10.1109/TBC.2018.2811623.

19. **Nguyen D. C. et al.** The effectiveness of tone reservation method for peak-to-average power ratio reduction of SEFDM signals with optimal envelopes // 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). IEEE, 2019, pp. 165-168. DOI: 10.1109/EExPolytech.2019.8906819.

20. **Tellado J.** Multicarrier modulation with low PAR: applications to DSL and wireless. Springer Science & Business Media. 2006, vol. 587. DOI: 10.1007/b117134.

21. **Шеннон К.** Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Издательство иностранной литературы. 1963. 832 с.

UDC 621.376; 621.391.82

TWO-CRITERIAL SYNTHESIS OF OFDM-SIGNALS TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY AND NOISE IMMUNITY

A. A. Lisnichuk, Ph.D. (in technical sciences), associate professor of the Radio Control and Communication Department, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-6562-6942, e-mail: a.a.lisnichuk@gmail.com
A. V. Batishchev, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-6142-1170, e-mail: anrusba@ya.ru

The work aim *is OFDM-signal two-criterion synthesis to increase communication radio systems (CRS) energy efficiency and stability to the action of the interference concentrated over a spectrum. The problem is relevant due to the spectral resource overload (which in turn leads to requirements for increasing noise immunity to minimize the effect of interfering factors) and PAPR high value (leading to low energy efficiency) in modern CRS based on OFDM-signals. Two-criterion signal synthesis was used to solve the problem. AWGN and bandpass interference are considered as an interfering effect. The gain in PAPR of the synthesized OFDM-signal compared to the known OFDM-signal at the Complementary Cumulative Distribution Function level (CCDF-level) of* 10^{-3} *is about 4 dB, and bit error rate (BER) probability at fixed value of* E_b/N_0 *= 14 dB decreases from 2.5E-2 to 1.3E-5 (signal-to-interference ratio = 9 dB).*

Key words: *OFDM; energy efficiency; noise immunity; multi-criteria synthesis; PAPR; Tone Reservation.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-76-3-16

References

1. **Weiss T. A., Jondral F. K.** Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency. *IEEE communications Magazine*. 2004, vol. 42, no. 3, pp. 8-14. DOI: 10.1109/MCOM.2004.1273768.

2. **Liang L., Ye H., Li G. Y.** Spectrum sharing in vehicular networks based on multi-agent reinforcement learning. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2019, vol. 37, no. 10, pp. 2282-2292. DOI: 10.1109/JSAC.2019.2933962.

3. **Zhang L., Liang Y. C., Xiao M.** Spectrum sharing for Internet of Things: A survey. *IEEE Wireless Communications*. 2018, vol. 26. no. 3. pp. 132-139. DOI: 10.1109/MWC.2018.1800259.

4. LTE [Web resource]: URL: https://www.3gpp.org/LTE/. Date of the application: 01.04.2021

5. **Lisnichuk A. A.** DSSS Signals Multi-Criteria Synthesis for Cognitive Radio Systems Adaptation to Complex Interference. *2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. IEEE, 2020, pp. 1-5. DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134274.

6. **John G. Proakis, Salehi M.** *Digital communications*. McGraw-Hill. 2008.

7. **Sklar B. et al.** *Digital communications: fundamentals and applications*. 2001.

8. **Cho Y. S. et al.** MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. *John Wiley & Sons*. 2010.

9. **Jang K. et al.** Spectrum characteristics and predistortion gain in the nonlinear high power amplifier (HPA). *2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. – IEEE. 2017, pp. 931-934. DOI: 10.1109/ICTC.2017.8190817.

10. **Ochiai H., Imai H.** Block coding scheme based on complementary sequences for multicarrier signals. *IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*. 1997, vol. 80, no. 11, pp. 2136-2143.

11. **Tuzov G.I., Sivov V.A., Prytkov V.I. i dr.** Pomekhozashchishchennosti radiosistem so slozhnymi signalami (Noise immunity of radio systems with complex signals) // Pod red. G.I. Tuzova. Moscow: Radio i svyaz', 1985. 264 p. (in Russian).

12. **Han S. H., Lee J. H.** An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission. *IEEE wireless communications*. 2005, vol. 12, no. 2, pp. 56-65. DOI: 10.1109/MWC.2005.1421929.

13. **Savinkov A. Yu., Pribytkov Yu. N., Marshakov V. K.** Harakteristiki kvazioptimal'nogo algoritma podavleniya polosovyh pomekh pri prieme signala OFDM. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika*. 2014, no. 4, pp. 45-53. (in Russian).

14. **Coulson A. J.** Bit error rate performance of OFDM in narrowband interference with excision filtering // IEEE transactions on wireless communications. 2006, vol. 5, no. 9, pp. 2484-2492. DOI: 10.1109/TWC.2006.1687772.

15. **Tellado J.** *Peak-to-average power reduction for multicarrier modulation*. Ph. D. thesis. 1999.

16. DVB-T2 Common Simulation Platform: [Web resource]. SourceForge URL: http://dvb-t2-csp.sourceforge.net. Date of the application: 01.04.2021

17. ETSI E. N. 302 755 Digital Video Broadcasting (DVB). *Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*. 2012, vol. 1.

18. **Bulusu S. S. K. C. et al.** Quasi-optimal tone reservation PAPR reduction algorithm for next generation broadcasting systems: A performance/complexity/latency tradeoff with testbed implementation. *IEEE Transactions on Broadcasting*. 2018, vol. 64, no. 4, pp. 883-899. DOI: 10.1109/TBC.2018.2811623.

19. **Nguyen D. C. et al.** The effectiveness of tone reservation method for peak-to-average power ratio reduction of SEFDM signals with optimal envelopes. *2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*. IEEE, 2019, pp. 165-168. DOI: 10.1109/EExPolytech.2019.8906819.

20. **Tellado J.** Multicarrier modulation with low PAR: applications to DSL and wireless. *Springer Science & Business Media*. 2006, vol. 587. DOI: 10.1007/b117134.

21. **Shannon K.** *Raboty po teorii informacii i kibernetike* (Works on information theory and cybernetics). Moscow: Publishing house of foreign literature. 1963, 832 p. (in Russian).