

Повышение энергоэффективности систем передачи с OFDM на основе дифференциального преобразования сигналов

Г.С. Воронков^а, И.В. Кузнецов^а

^а Уфимский государственный авиационный технический университет, 450000, ул. Карла Маркса, 12, Уфа, Россия

Аннотация

Рассматривается способ повышения энергоэффективности OFDM-систем на основе дифференциального преобразования и экстраполяции. Производится анализ возможной структуры экстраполятора, рассматривается вопрос реализации экстраполятора на основе фильтра Калмана – Бьюси и фильтра Винера. Проводится имитационное моделирование, приводятся результаты, подтверждающие эффективность предложенной схемы.

Ключевые слова: OFDM; динамический диапазон; сжатие; экстраполяция; энергоэффективность; дифференциальный метод

1. Введение

В настоящее время одним из основных направлений развития телекоммуникаций является увеличение скорости передачи данных. Для решения этой задачи применяется квадратурная модуляция и ортогональное частотное уплотнение. В качестве примера можно привести как сети подвижной радиосвязи (СПРС) 4 и 5 поколений [1,2], так и современные межспутниковые коммуникации [3]. При этом повышение скорости передачи при сохранении параметров канала требует повышения отношения сигнал-шум на входе приёмника, что обуславливает рост мощности передатчиков. Увеличение мощности, в свою очередь, делает более сложным процесс разработки оконечных усилителей СВЧ и приводит к повышению энергопотребления устройств, что негативно сказывается на времени их автономной работы. Для снижения выходной мощности на текущий момент применяются различные способы. В сетях подвижной радиосвязи второго поколения (GSM, DCS) используется управление мощностью мобильного терминала базовой станцией (БС). После начала сеанса связи БС начинает измерять уровень сигнала, принимаемого от мобильной станции (МС) и с помощью служебных команд регулирует выходную мощность терминала. Этот процесс носит итеративный характер, мощность передатчика МС снижается постепенно до достижения порогового значения, которое БС сочтёт оптимальным [4]. При ухудшении качества связи БС также итеративно увеличивает мощность передатчика до предельной. Очевидно, что указанный алгоритм требует наличия постоянного канала управления в системе. С точки зрения теории автоматического управления, осуществляется регулирование по обратной связи.

В сетях 3 и 4 поколения (UMTS, LTE), изменение мощности происходит по иному алгоритму. Поскольку в этих системах абоненты, находящиеся в зоне обслуживания одного сектора БС, передают и принимают информацию в одной полосе частот, мощность МС регулируется не с максимального значения в сторону уменьшения, а наоборот – с минимального значения до оптимального, обеспечивающего заданное качество связи (во избежание создания помех другим терминалам, находящимся вблизи МС). Изменение также происходит в соответствии с командами, поступающими от БС [1,5]. Следует отметить, что в обоих случаях речь не идёт об уменьшении максимальной мощности передатчика МС, а лишь о подстройке мощности в соответствии с условиями распространения сигнала. регулирование мощности носит характер поддержания заданного качества связи.

Интересным представляется способ уменьшения максимальной выходной мощности передатчиков, что позволяет увеличить время автономной работы и ресурс эксплуатации системы [6]. Известен, например, метод поворота сигнального созвездия квадратурной модуляции. Этот способ позволил добиться уменьшения мощности на значения до 1 дБ [7]. Однако его использование требует замены квадратурных модуляторов существующих устройств связи, поскольку речь идёт об ином способе формирования сигнального созвездия, то есть повышает функциональную сложность устройств.

С целью снижения максимальной выходной мощности передатчика без его существенного функционального усложнения предлагается дополнить традиционную схему формирования OFDM-сигнала его дифференциальным преобразованием. Под дифференциальным преобразованием сигнала понимается процедура снижения динамического диапазона сигнала OFDM путём экстраполяции его значения. При этом передаточная функция экстраполятора должна быть синтезирована с учётом свойств сигнала и действующей в канале помехи. Дифференциальное преобразование позволяет уменьшить мощность полосового OFDM-сигнала, излучаемого в канал связи, при сохранении помехоустойчивости системы, что показано в данной работе.

2. Схема экстраполяции

В общем случае можно предложить 2 основных способа дифференциального преобразования: по входу и по выходу. Обобщённая схема тракта формирования и приёма OFDM-сигнала приведена на рис. 1.

Для осуществления приёма необходимо, чтобы параметры экстраполятора были известны на приёмной стороне. Для уменьшения объёмов вычислений на приёме предлагается передавать эти параметры по каналу вторичного уплотнения.

Если параметры экстраполятора изменяются намного медленнее, чем сигнал, можно рассматривать канал вторичного уплотнения как канал без потерь. Тогда экстраполяторы на передающей и приёмной сторонах оказываются идентичными.

При реализации схемы дифференциального преобразования «по выходу» в качестве экстраполятора можно использовать фильтр Калмана – Бьюси. Преимущества такой схемы:

- 1) возможность учесть канальную помеху напрямую в модели;
- 2) возможность работы с нестационарными сигналами;
- 3) возможность решения задачи в цифровой форме.

Недостатки схемы:

- 1) большая ошибка предсказания на начальных этапах наблюдения сигнала;
- 2) возможная проблема обеспечения устойчивости.

К недостатку можно также отнести и тот факт, что необходимо будет решать систему уравнений состояния и наблюдения для квадратурных каналов, что представляет некоторую сложность.

Учитывая указанные недостатки, предлагается использовать схему дифференциального преобразования «по входу», синтезируя передаточную функцию экстраполятора на основе решения уравнения Винера-Хопфа. С целью уменьшения количества элементов схемы также предлагается использовать общий экстраполятор, дополненный блоком координирования, для обработки сигналов и синфазного, и квадратурного каналов, так, как это показано в [8]. В этом случае рассматривается расчётная модель, приведённая на рис. 2.

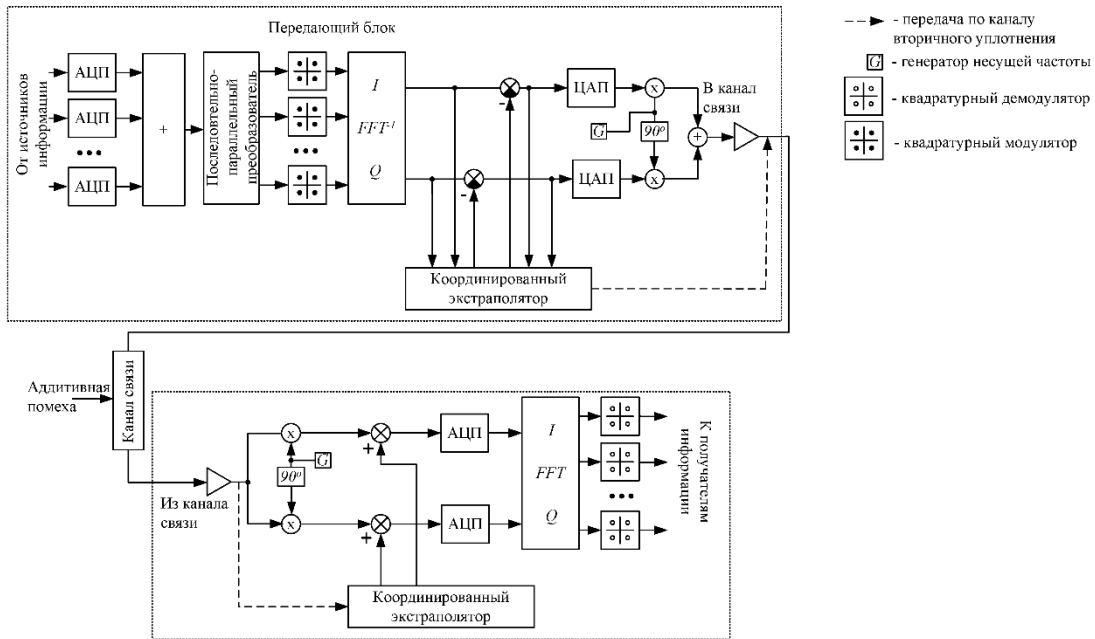


Рис. 1. Обобщённая схема тракта системы OFDM с дифференциальным преобразованием.

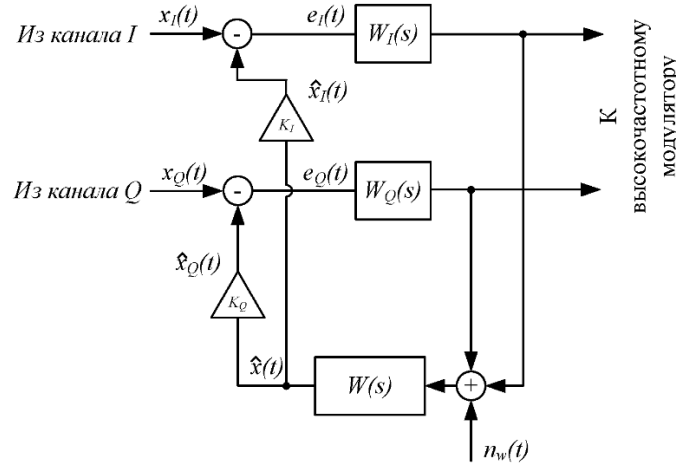


Рис. 2. Расчётная модель тракта формирования сигнала OFDM при использовании координированного экстраполятора.

Функции $x_I(t)$, $x_Q(t)$ – синфазная и квадратурная составляющие полосового сигнала OFDM на выходе блока обратного быстрого преобразования Фурье, $\hat{x}_I(t)$, $\hat{x}_Q(t)$ – экстраполированные значения соответствующих функций, $e_I(t)$, $e_Q(t)$ – разностные сигналы. Предложенная схема при синтезе искомой передаточной функции экстраполятора $W(s)$, где s – комплексная переменная Лапласа, учитывает также действующую в канале помеху $n_w(t)$, спектральная плотность мощности (СПМ) Φ_{Nw} которой считается известной. Передаточные функции $W_I(s)$ и $W_Q(s)$ описывают процессы

преобразования и задержки в синфазном и квадратурном каналах и также являются известными. Синтез передаточной функции приведён в [8, 9]. В общем виде передаточная функция экстраполятора может быть представлена в виде:

$$W(s) = \frac{1}{\Phi_{zz}^+(s)} \left[\frac{\Phi_{zx}(s)}{\Phi_{zz}^-(s)} \right]_+$$

где $\Phi(s)$ – взаимная спектральная плотность сигналов, указанных в индексе;

$x(t)$ – синфазная либо квадратурная компонента полосового OFDM-сигнала;

$z(t)$ – синфазная либо квадратурная компонента полосового OFDM-сигнала, смешанная с помехой, $z(t) = x(t) + n_w(t)$.

В [9] получено решение для частного случая, когда СПМ представимо в следующем виде:

$$\Phi_{xx}(s) = \frac{1}{a_1^2 (\alpha^2 - s^2)},$$

$$\Phi_{mm}(s) = \frac{1}{a_2^2}.$$

Тогда передаточная функция экстраполятора имеет вид:

$$W(s) = \frac{K_1}{1 - K_1 + \tau s},$$

где

$$K_1 = \frac{a_2^2}{\sqrt{a_1^2 \alpha^2 + a_2^2} (a_1 \alpha + \sqrt{a_1^2 \alpha^2 + a_2^2})},$$

$$\tau = \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 \alpha^2 + a_2^2}}.$$

Имитационное моделирование проводилось для приведенных выше параметров экстраполятора.

3. Имитационное моделирование

Имитационное моделирование предложенного решения проводилось в пакете MatLab. Ширина полосы канала 8 МГц, количество поднесущих OFDM – 16. Канал моделируется как среда с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ), мощность которого обуславливает отношение сигнал-шум на приёме на уровне 22 дБ. при этом не учитывается многолучевое распространение и замирания в канале связи. Указанные исходные данные и допущения применимы при использовании предложенного метода для канала связи с микроспутником дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (канал «спутник – микроспутник») или для канала связи малогабаритного беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с наземной станцией управления. В качестве квадратурной модуляции используется QPSK. В качестве сообщения используется спутниковый снимок системы ДЗЗ размером 512x512 пикселей в формате BMP без сжатия, цветовая схема – оттенки серого. Обработываемый снимок и его гистограмма приведены на рис. 3.

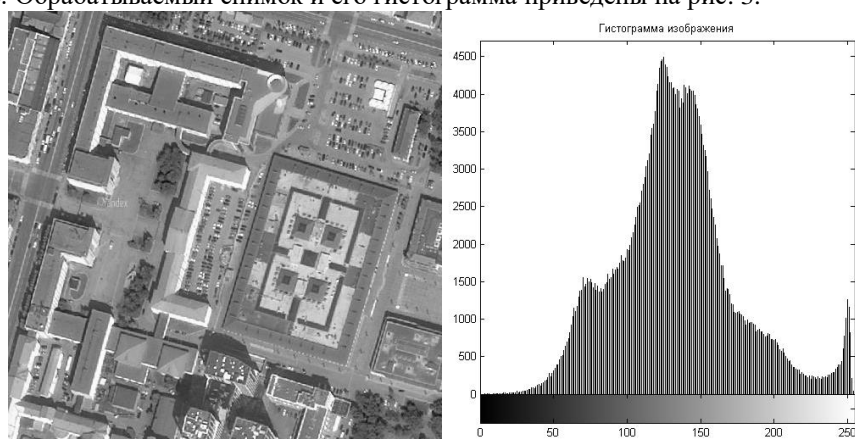


Рис. 3. Обработываемое изображение и его гистограмма.

Графический файл разбивается на фрагменты 32x32 пикселя, затем каждый из полученных 256 фрагментов преобразуется в двоичный формат, после чего формируются символы QPSK, которые подвергаются обратному быстрому преобразованию Фурье, что позволяет получить первый тип полосового сигнала. Далее полученный сигнал подвергается свёртке с импульсной характеристикой экстраполятора, вычисляется разность между исходным сигналом и его экстраполированным значением, таким образом, формируется второй тип полосового сигнала – сигнал, сжатый по

дифференциальной схеме. На рис. 4 приведены временные диаграммы синфазной и квадратурной составляющих полосового сигнала для одного из фрагментов изображения. Затем вычисляется мощность сигнала без сжатия и со сжатием. Далее формируется третий вариант полосового сигнала – мощность исходного (несжатого) сигнала понижается до соответствующего значения мощности сигнала, полученного по дифференциальной схеме. Затем имитируется передача сформированных полосового сигнала по каналу с АБГШ. Принятый полосовой сигнал проходит процедуру прямого преобразования Фурье. Поскольку ранее было получено 3 варианта полосового сигнала, появляется возможность сравнить сигнальные созвездия QPSK, полученные обработкой разных полосовых сигналов, и оценить символьную ошибку. Сигнальные созвездия принятого сигнала для случая передачи одного из фрагментов приведены на рис.5, слева направо: сигнальное созвездие для случая передачи исходного сигнала без преобразования, при использовании дифференциального преобразования полосового сигнала и при снижении мощности исходного сигнала до уровня мощности сигнала, прошедшего дифференциальное преобразование.

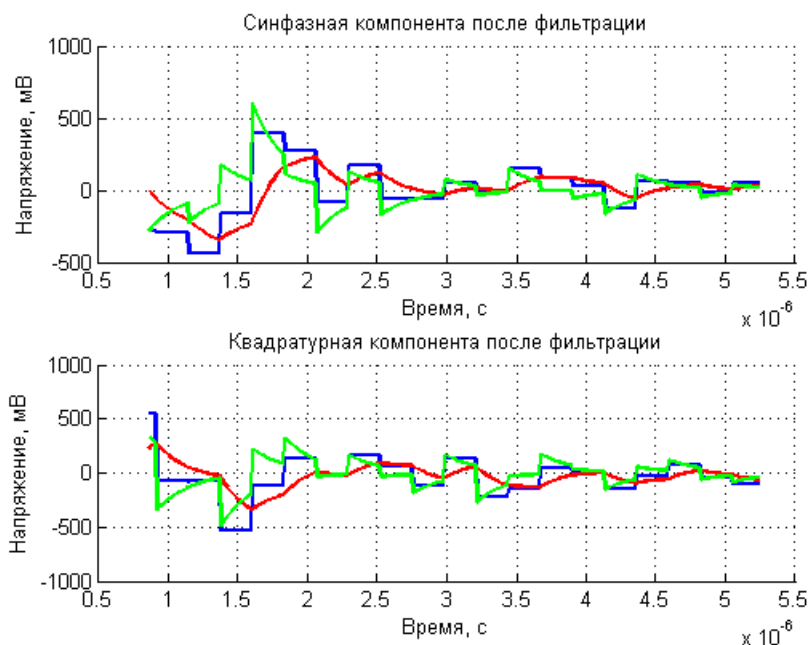


Рис. 4. Временные диаграммы. Синий – исходный сигнал, красный – сигнал на выходе экстраполятора, зелёный – сигнал после дифференциального преобразования.

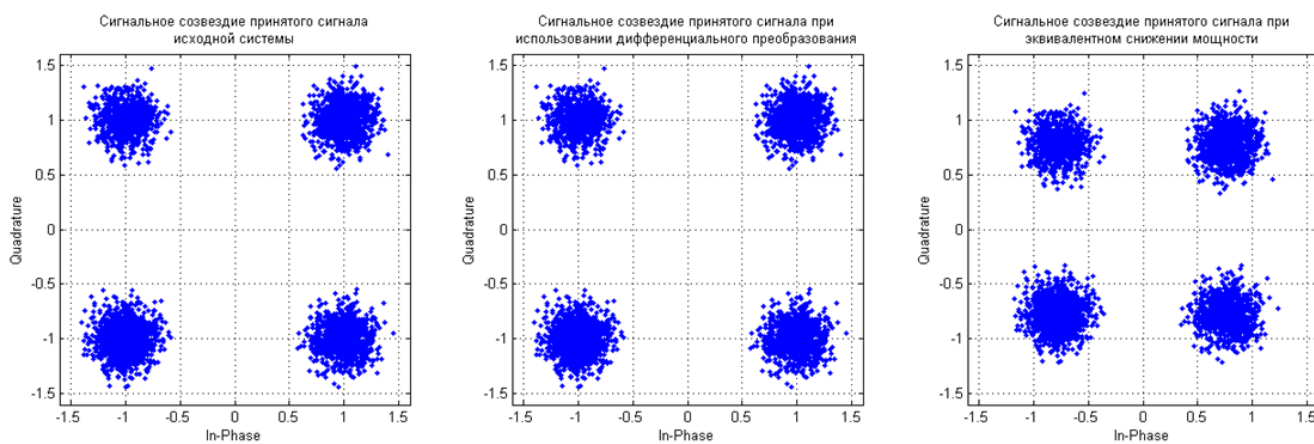


Рис. 5. Сигнальные созвездия принятых сигналов.

Поскольку изначально изображение было разбито на 256 фрагментов, в результате моделирования было получено 256 значений выигрыша по мощности при использовании дифференциального преобразования. На рис. 6 приведена гистограмма полученных значений. По горизонтальной оси отложены коэффициенты сжатия, дБ, по вертикальной – количество информационных посылок.

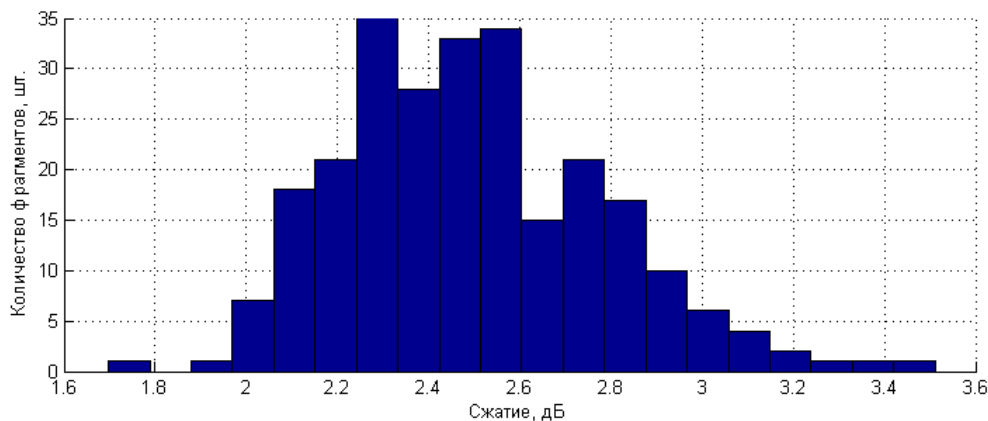


Рис. 6. Гистограмма коэффициентов сжатия.

Согласно результатам моделирования, дифференциальное преобразование позволило снизить мощность полосового сигнала в среднем на 2,49 дБ относительно исходного сигнала. При этом соответствующее уменьшение мощности без экстраполяции приводит к увеличению символьной ошибки. Для несжатого сигнала и для сигнала, подвергнутого дифференциальному преобразованию, средний коэффициент символьной ошибки составил $0,000947 \text{ с}^{-1}$, в то время как для сигнала с пониженной мощностью средний коэффициент символьной ошибки оказался равен $0,0638 \text{ с}^{-1}$. Полученный результат можно трактовать также иначе: применение дифференциального преобразования позволяет снизить требуемое отношение сигнал-шум на приёме в среднем на 2,49 дБ без ухудшения качества связи.

4. Заключение

В работе представлена расчётная модель дифференциального преобразования OFDM-сигнала на основе его экстраполяции. Произведено имитационное моделирование предложенного решения для радиоканала малой дальности с АБГШ без учёта замираний в канале. Высокое значение отношения сигнал-шум, заданное в эксперименте, объясняется отсутствием в моделирующей программе помехоустойчивого кодирования. Результаты моделирования подтверждают, что предложенный способ дифференциального преобразования позволяет уменьшить амплитуду и снизить мощность полосового сигнала без ухудшения помехоустойчивости системы. Таким образом, предложенная схема формирования сигнала OFDM позволяет повысить энергоэффективность системы связи без снижения показателей качества связи.

Литература

- [1] LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access / edited by Harri Holma and Antti Toskala – John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [2] Fundamentals of 5G Mobile Networks / edited by Jonathan Rodriguez –John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
- [3] ITU-R M.2047-0. Detailed specifications of the satellite radio interfaces of International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT-Advanced).
- [4] Громаков, Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи / Ю. А. Громаков – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 1998. — 239 с.
- [5] GSM, GPRS and EDGE performance. Evolution Towards 3G/UMTS / edited by Timo Halonen, Javier Romero, Juan Melero – John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [6] Филатов, П.Е. Повышение эффективности энергодефицитных многоканальных систем связи на основе координированного преобразования сигналов / Филатов П.Е. // “Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы-2016”(ПРЭФЖС-2016) – Международная научно-техническая конференция.– 2016, – с. 143-148.
- [7] Markiewicz, Tomasz G. An Energy Efficient QAM Modulation with Multidimensional Signal Constellation / Tomasz G. Markiewicz // International Journal of Electronics and Telecommunications. – 2016. – Vol.62, № 2. – P. 159–165. DOI: 0.1515/eletel-2016-0022.
- [8] Кузнецов, И.В., Воронков, Г.С., Султанов, А.Х., Антонов, В.В. Разработка дифференциального OFDM-преобразователя с координированным предсказанием сигналов для энергодефицитных систем связи / И.В. Кузнецов, Г.С. Воронков, А.Х. Султанов, В.В. Антонов // Радиотехника. – 2016. – №12, – С. 59-63.
- [9] Воронков, Г.С., Кузнецов, И.В. Подход к концепции построения низкоскоростных OFDM-модемов для энергодефицитных систем связи / Г.С. Воронков, И.В. Кузнецов // Электротехнические и информационные комплексы и системы – 2016. – Т. 12, №3, – С. 44-49