

УДК 621.376, 621.396

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ С OFDM-СИГНАЛАМИ**

**Е. Н. Рычков, В. Г. Патюков**

**Институт инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского Федерального  
Университета**

Статья поступила в редакцию 2 декабря 2015 г.

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы разработки систем связи с OFDM-сигналами на примере программно-определяемой радиосистемы, исследованы особенности работы алгоритмов этих систем, таких как метода резервации тона и возможности варьирования типа преобразования, а также даны рекомендации по модификации использованных алгоритмов. Рассмотрен метод создания широкополосного модема на программно-определяемой радиосистеме. Результаты работы позволяют получить качественно новые системы связи, особенно для тропосферных и спутниковых решений.

**Ключевые слова:** OFDM, программно-определяемая радиосистема, метод резервации тона, пик-фактор, косинусное преобразование, фазовая манипуляция, алгоритмы QAM, MATLAB.

**Abstract.** Problems of the development of communication systems with OFDM-signals on the example of the software-defined radio are considered, features of the algorithms of these systems are studied, such as tone reservation method and the possibility of varying the type of transformation, as well as recommendations for modification of the algorithms used. The method of creating a broadband modem on software-defined radio system is researched. The results allow to obtain a qualitatively new communication systems, especially for tropospheric and satellite solutions.

**Key words:** OFDM, software defined radio system, the method of reservation tone, PAPR, cosine transform, phase shift keying, algorithms QAM, MATLAB.

## Введение

Механизм мультиплексирования или уплотнения с помощью использования ортогональных поднесущих частот определяет технологию построения систем связи с OFDM. Положительные стороны такой технологии включают достаточно высокое противодействие к межсимвольным помехам, связанным с многолучевым распространением сигналов, простую аппаратную реализацию, основанную на цифровой обработке сигналов, а также возможность использования различных методов модуляции для каждой поднесущей частоты, что определяет скорость передачи информации и помехоустойчивость системы связи. Но не идеальность современных приемников и передатчиков, их фазовые шумы ограничивают эффективность работы таких систем связи. Кроме того необходимость использования защитного интервала ухудшает спектральные характеристики.

На территории России имеются труднодоступные для связи районы и регионы, где с низкой скоростью и помехоустойчивостью обеспечивается связь, например это северные регионы, подводная связь, выполнение спасательных работ МЧС и др. [1]. Поэтому важно повышать скорость обмена данными и помехоустойчивость таких систем связи. Во всех ситуациях нельзя полагаться на возможности работы только одних видов систем связи, например, спутниковых, или узкополосных тропосферных. Поэтому постоянно требуются новые алгоритмы построения систем связи, модернизированные решения, повышающие вероятность выполнения тех или иных стратегических задач.

С другой стороны, использование готовых, но закрытых от изменений систем связи на кристалле, закрытых архитектурных построений, приводят к неопределенности, которые могут обеспечить решения компаний Realtec, ST и других. Можно заложить такие решения на кристалле, ввести любые ограничения, недостатки, которые исследователь уже исправить не сможет. За сравнительно большую стоимость уже сейчас можно получить лабораторные OFDM-решения известных компаний, таких как LabVIEW, Keysight и других, а работа отдельных блоков устройства скрыта от пользователя, то есть со

многими тонкостями алгоритмов и блоков устройства разобраться до конца не представляется возможным и можно лишь использовать их в конкретных реализациях [2]. Необходимо не только следить за состоянием и интерфейсами относительно зарубежных разработок, но и вводить в свои разработки определенные ноу-хау.

Технология OFDM ведет в сравнительно молодое направление исследований, потому что раньше не было аппаратных возможностей для полноценного использования этого вида модуляции [2]. Имеются алгоритмы для данной технологии, такие как резервация тона (TR), экспоненциальное усечение, эквализация канала, оптимизация передачи по разным поднесущим частотам, выбор метода преобразования [3]. Технология OFDM позволяет зарубежным компаниям Comtech и Raytheon заявлять о скоростях некоторых тропосферных решений более 20 Мб/с, тогда как крупнейший российский производитель систем данного рода АО «НПП «Радиосвязь» имеет предел около 2 Мб/с при соответственных ограничениях на мощность сигнала [4, 5].

В статье рассмотрены известные алгоритмы систем связи и даны предложения по их дальнейшему совершенствованию. Результаты работы представлены в виде программного модема OFDM, выполненного в среде MATLAB, сигналы с которого можно генерировать векторным оборудованием Keysight или платой Ettus SDR [6].

## **2. Преимущества построения OFDM-систем на программно-определяемой радиосистеме с использованием программного пакета MATLAB**

На сайте [6] имеются решения, позволяющие за 190000 рублей (если покупать в России с официального сайта Ettus) получить 2 программно-определяемых приемо-передатчика, на базе которых можно построить полноценную систему связи. Параметры данного решения позволяют генерировать сигналы до 6 ГГц в полосе до 50 МГц [4, 5], официально имеется совместимость с пакетом MATLAB [6].

На рис. 1 приведены новые результаты работ с учетом ранее использованных программ исследователей французской лаборатории XLIM [2].

Компьютерный файл «picture.jpg» кодируется с помощью БЧХ-кодов с проверкой на четность, далее выполняется 16-QAM модуляция. На втором шаге («шаг 2») происходит OFDM-модуляция. Затем сигнал проходит через канал, претерпевает процесс демодуляции, и на пятом шаге переданная информация восстанавливается в файл «result.jpg». Если нажать кнопку «Сохранить IQ», то сгенерируется OFDM-сигнал. Имеются возможности передачи IQ-данных на векторный генератор Keysight по Ethernet-протоколу, а затем захват данных с векторного анализатора, и обработка в этой же программе для получения исходных данных.

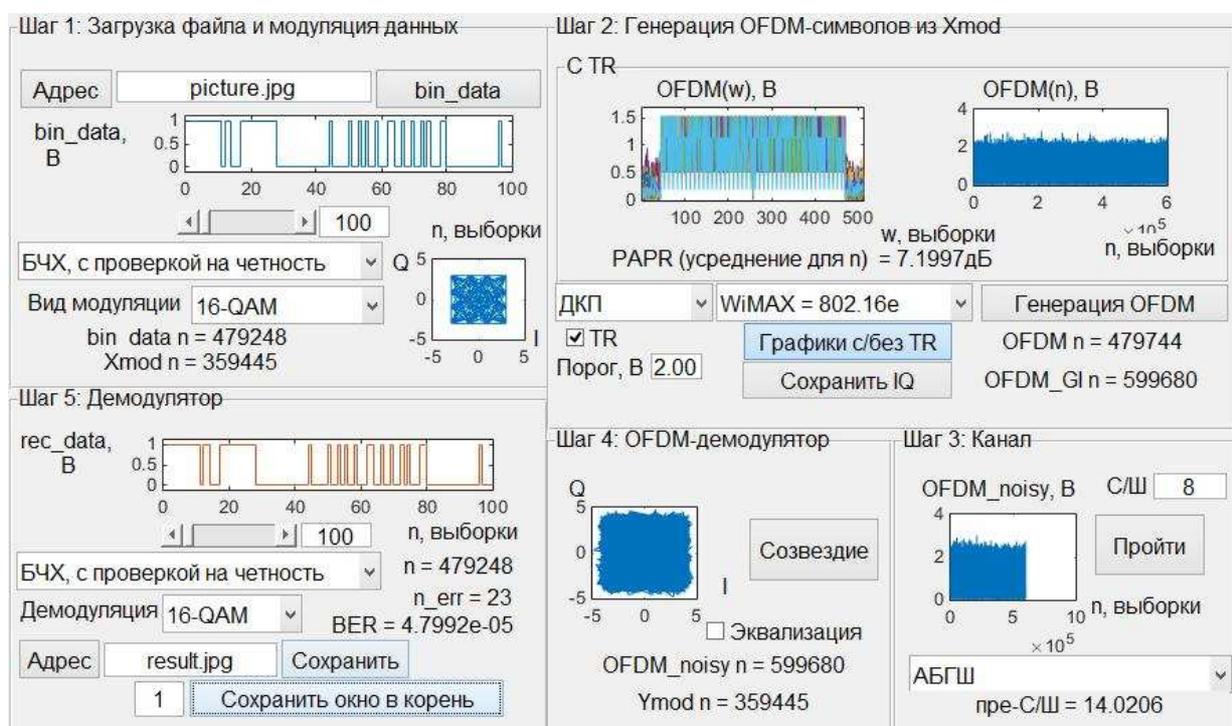


Рис. 1. Передача и прием OFDM-сигналов.

Рассмотрим подробнее работу программы, представленной на рис. 1. Для генерации OFDM-сигнала необходимо сгенерировать бинарные данные с помощью кнопки с надписью «bin\_data» (шаг 1), затем нажать на кнопку «Генерация OFDM» (шаг 2). Если выбран чек-бокс TR, то происходит генерация как OFDM-сигнала без использования метода резервации тона, так и сигнала, прошедшего операцию резервации тона. На рис. 1 можно видеть на шаге 2 слева все сгенерированные поднесущие OFDM-сигнала, то есть

«нулевые», пилоты и информационные составляющие. Амплитуда нулевых поднесущих частот отлична от 0, так как они зарезервированы под сигналы, благодаря которым можно подстроить OFDM-сигнал во временной области таким образом, что его амплитуда практически не будет выходить за пределы некоторого определенного порога, который также задается в настройках на рис. 1. Имеется возможность выбора между стандартами WiFi и WiMAX для определения параметров генерируемого OFDM-символа. После генерации сигнал можно пропустить через каналы Рэлея или АБГШ (с аддитивным белым Гауссовым шумом без многолучевости). Эта возможность также контролируется с помощью представленного интерфейса программы на рис. 1.

Для восстановления информации и подсчета ошибок, возникших в системе, необходимо нажать сначала на кнопку «Созвездие» (шаг 4), а затем «Сохранить» (шаг 5). Стоит отметить, что программа на рис. 1 выдает значение ошибки BER равное  $4.992e^{-5}$  при БЧХ-кодировании, использовании стандарта WiMAX с каналом АБГШ. Соотношение С/Ш вычисляется программными средствами, как отношение амплитуд сигналов информационного и шумового, выраженное в дБ.

Для работы с MATLAB имеется возможность использования векторных генератора и анализатора. Рассмотрим преимущества пути создания систем связи с помощью программно-определяемой радиосистемы. Стоимость решения почти на 2 порядка ниже по сравнению с затратами на векторное оборудование Keysight, имеются пути создания высокоскоростных систем. Решение основано на популярных в инженерной среде продуктах – программно-определяемой радиосистеме и математическом пакете MATLAB, под которые написано много функций, например таких как Вейвлет- и Фурье-преобразования, что облегчает использование и добавление алгоритмов, а также делает систему ближе к математической модели с возможностью идеализации. Судя по характеристикам, приведенным в [6], плата USRP-B200mini генерирует подобные сигналы, поэтому программа (рис. 1) может использоваться, как полноценный модем, где можно внедрять и исследовать

собственные и нестандартные алгоритмы. Теоретически достижимая скорость передачи данных составляет 2 Мб/с и выше для представленной на рис. 1 программе [3].

### **3. Исследование возможностей и алгоритмов OFDM-модема**

Рассматриваемая программа, приведенная на рис. 1, выполнена так, что практически все используемые параметры можно изменять, что позволяет более гибко проводить необходимые исследования.

На основании программы (рис. 1) сигнал успешно принимается при соотношении сигнал-шум (С/Ш) равным 8 дБ с вероятностью ошибки бита порядка  $10^{-5}$  при модуляции 16-QAM. В настоящее время недостаточно просто использовать быстрое преобразование Фурье (БПФ), чтобы сгенерировать из частотной области OFDM-сигнал во временной области [3]. Существуют стандарты OFDM в зависимости от типа канала связи и потребностей в скорости передачи данных, помехоустойчивости и потребления ресурсов, например, частотной полосы: WiFi, WiMAX, LTE и другие. Стандарт WiFi самый низкоскоростной, и при числе поднесущих частот равным 64 способен обеспечить скорость 6Мб/с. Они регламентируют позиции нулевых поднесущих частот и пилот-сигналов, а так же длину преобразования Фурье. В системах с тропосферной связью замирания канала представлены в первом приближении суммой быстрых замираний с распределением Рэлея, и медленных с нормально-логарифмическим распределением. Уровень замираний достигает значений -40дБ, что не позволяет использовать, например, стандарт WiMAX в классическом виде, но известны алгоритмы адаптации скорости передачи данных для каждой конкретной поднесущей частоты, что в данной работе пока не рассматривается [3].

### **4. Метод резервации тона (Tone Reservation (TR)) и возможность выбора вида преобразования**

На рис. 1 приведен сигнал OFDM(w) (шаг 2), в котором используются нулевые поднесущие частоты в качестве частот для уменьшения пик-фактора OFDM-сигнала. Проблема уменьшения пик-фактора связана с нелинейной

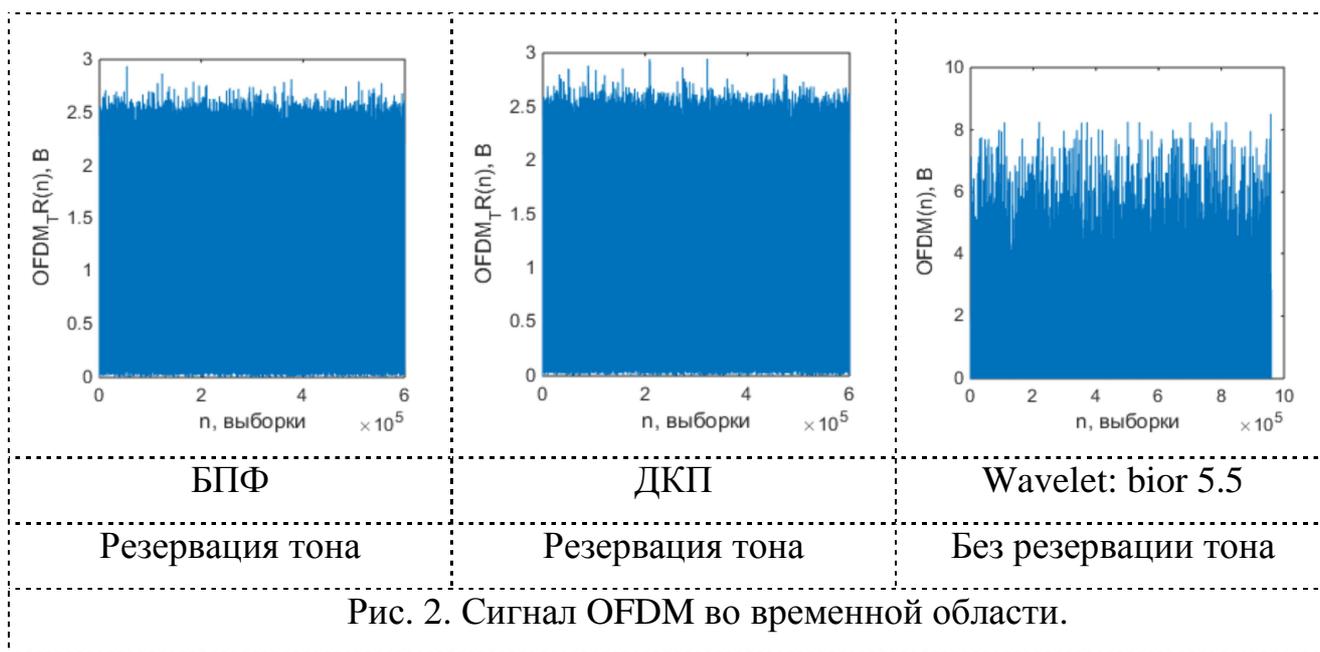
характеристикой усилителей, которая не позволяет генерировать сигналы с высокой мощностью и характеризуется отношением пиковой мощности к средней мощности (Peak to Average Power Ratio (PAPR, пик-фактор)). Если использовать методы усечения, то есть просто ограничить пики OFDM-сигнала – это приводит к ошибкам в передаваемом сообщении [2]. В настоящее время для решения этой проблемы имеются методы – усечения, резервации тона, нелинейного усечения и другие. Это актуально потому, что при излучении больших мощностей требуются усилители с линейной характеристикой, не вносящие нелинейных искажений в спектр сигнала. Уменьшение PAPR быстрыми и эффективными методами позволяет значительно снизить стоимость и комплексность усилителей в выпускаемой продукции.

Следует отметить недостатки метода резервации тона, видные по результатам работы – требуется несколько итераций, чтобы сформировать на нулевых поднесущих частотах компенсирующие частоты, а также без дополнительных методов передачи заполнение нулевых поднесущих частот приводит к увеличению полосы частот сигнала. Известен метод внесения нелинейных предискажений для компенсации передаточной функции усилителя [7]. Однако при внесении предискажений нужно знать хотя бы приблизительную импульсную характеристику усилителя, а она варьируется для каждой модели. Таким образом, метод резервации тона позволяет при небольшом расширении полосы частот сигнала подготовить OFDM-сигнал к прохождению через любую модель усилителя, тогда как при внесении предискажений полоса сигнала не увеличивается, а в программу коррекции можно внести разные модели усилителей.

Частотный спектр подбирается так, чтобы во временной области флуктуации огибающей OFDM-сигнала не превышали некоторый пороговый амплитудный уровень. Например, если порог равен 2.5, то программа найдет наиболее близкие варианты сигнала, у которого амплитуда в среднем не превышает значения 2.5. Это показано на среднем графике рис. 2 (на этом рисунке приведены окна, сгенерированные программой по рис. 1) для случая с

дискретным косинусным преобразованием (ДКП), и здесь же слева показан случай использования БПФ.

Вейвлет-обработка вида *bior 5.5* (как видно справа на рис. 2), приводит к большому значению пик-фактора сигнала. Заметим, что в этом случае метод резервации тона не применяется. Однако в работах индийских ученых [8] говорится о большей помехоустойчивости в случае использования этого преобразования, что при текущих параметрах системы не наблюдается.



### 5. Пути улучшения метода резервации тона и классических преобразований, используемых в OFDM-системах, для повышения их помехоустойчивости

В настоящее время ведутся работы по комбинации разных методов уменьшения пик-фактора OFDM-сигнала, а также модификации методов. Так например, кроме простого метода усечения существует метод экспоненциального усечения [9]. Однако в данной статье рассматривается не возможность комбинирования разных вариантов, а путь их модернизации. Возможен вид преобразования, аналогичный преобразованию Фурье, который мог бы выполняться быстро на нейросетях и давать небольшое значение пик-фактора сигнала. Так же с помощью нейронной сети можно существенно сократить скорость выполнения метода резервации тона. Заметим, что

преимущество этого метода в том, что он практически не искажает информацию в сигнале за счет использования лишь нулевых поднесущих частот, но изначально алгоритм требует выполнения нескольких итераций, и этот процесс можно сделать быстрее. Для полного обучения сети потребуется время, так как количество комбинаций, которое нейросеть должна запомнить при количестве бит данных равных 384 из всей длины ОБПФ 512 при 16-позиционной амплитудной квадратурной модуляции, составляет значение равное  $16^{384}$ . Если использовать нейросеть, то обучение будет долговременным, но с помощью нейросети можно оптимизировать определенные операции, которые выполняются в конкретной рабочей ситуации, тогда обучить систему можно гораздо быстрее. Тем более, обучать ее можно сразу многими пользователями в рабочих условиях, когда имеется возможность находить недостающие исходные данные на сервере [10].

Замечена и особенность зависимости количества ошибок от масштабирования созвездия принятого сигнала. Это известно в классических системах как адаптация порога при корреляционном приеме сигналов, варьирование значения порога [3]. Масштабирование этого сигнала может быть связано с методом предсказаний, которые делаются для конкретных моделей усилителей [7]. Таким образом, имеется возможность объединить алгоритмы выбора оптимального порога при определенных соотношениях С/Ш с методом уменьшения пик-фактора в OFDM-системах.

## **6. Выводы**

Ответ на вопрос “Какую аппаратную базу лучше использовать для разработки современной OFDM-системы?”, конечно, не может быть однозначен. Но с учетом вопроса о замещении импортных изделий, развития отечественных исследовательских институтов и центров, создания собственных алгоритмов нужны системы, в которых нет закрытых частей программ, модулей, которые приведены и не подлежат изменению. Приборы Keysight имеют слишком высокую стоимость, но можно использовать готовые наработки для изготовления высокочастотных плат под управлением ПЛИС,

что приводит к минимальному числу скрытых частей используемых программ, но это является трудоемким и дорогостоящим процессом. В данной статье рассмотрены пути использования программно-определяемых систем, особенности создания на их основе OFDM-модема, не уступающего по полосе частот и максимальной частоте в спектре сигнала оборудованию фирмы Keysight, но с ценой на оборудование на 2 порядка меньше.

Также рассмотрены алгоритмы резервации тона, эквализации, помехоустойчивого кодирования БЧХ, способного исправлять ошибки при проверке пакетов на четность. Найдены пути совершенствования алгоритмов OFDM-систем, такие как использование нейросети для адаптации стандарта. Рассмотрена возможность масштабирования созвездия, выбора оптимального порога, что означает не просто эквализацию, а работу со статистическими величинами.

### Литература

1. Конференция «Связь на русском севере». // [Электронный ресурс]. URL: <http://www.связьнасевере.рф>
2. Rychkov E., Patyukov V. Estimation of the Noise Immunity of Troposphere Communication Systems with OFDM Signals and Available Ways to Increase Ones Bit Error Ratio – Science and Information conference – London, 28-30 July 2015, pp. 973-977. // [Электронный ресурс]. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7237260&isnumber=7237120>
3. Glisic S., Lorenzo B. Advanced Communication Networks: 4G technologies – 2<sup>nd</sup> edition – Wiley, 2009.
4. Raytheon. // [Электронный ресурс]. URL: <http://raytheon.com>
5. Сайт АО «НПП «Радиосвязь». // [Электронный ресурс]. URL: <http://кртз.рф>
6. Ettus. // [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ettus.com/product/details/USRP-B200mini>

7. Sharma Ch., Tomar S. K., Gupta A. K. PAPR reduction in system using adapting coding technique with predistortion method. // [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ijarcsse.com/docs/papers/Volume\\_5/4\\_April2015/V5I4-0502.pdf](http://www.ijarcsse.com/docs/papers/Volume_5/4_April2015/V5I4-0502.pdf)
8. Gowri G., Uma Maheswari G. Performance analysis of DWT-OFDM and FFT-OFDM system / Gowri G., Uma Maheswari G. and others – International Journal of Engineering and Technology, 2013. // [Электронный ресурс]. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.411.6404&rep=rep1&type=pdf>
9. Sarala B, Venkateswarulu D.S., Bhandari B.N. MC-CDMA PAPR Reduction using a modified exponential companding transform with clipping. // [Электронный ресурс]. URL: [https://globaljournals.org/GJRE\\_Volume13/4-MC-CDMA-PAPR-Reduction-using-a-Modified.pdf](https://globaljournals.org/GJRE_Volume13/4-MC-CDMA-PAPR-Reduction-using-a-Modified.pdf)
10. Brainbot. // [Электронный ресурс]. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.paphus.brainbot>