

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.391:517.443

Канунников  
Игорь, Сергеевич

Демодуляция OFDM сигналов методами дискретного преобразования Фурье

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра техники и технологии  
по специальности 1-39 81 03 «Информационные радиотехнологии»

---

Научный руководитель

Козел Виктор Михайлович

---

кандидат технических наук, доцент

---

Минск, 2016

Техника ортогонального частотного разделения каналов (в англоязычной литературе – Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) получила широкое распространение в современных стандартах цифровой связи и продолжает активно развиваться. Она позволяет добиваться высокой спектральной эффективности, низкого уровня, или полного отсутствия межсимвольной интерференции, высокого качества передачи в условиях частотно селективных замираний при невысокой сложности реализации приемных трактов.

К числу стандартов, использующих OFDM относятся IEEE 802.11a,g,n – беспроводные локальные сети WiFi, IEEE 802.16 – широкополосная беспроводная связь WiMAX, DVB-T и DVB-T2 – цифровое телевизионное вещание, DRM – цифровое радиовещание и др. Также необходимо отметить перспективные системы с повышенной скоростью передачи на основе совмещенной технологии ортогонального частотного и пространственного разделения (MIMO OFDM – multiple input, multiple output OFDM): 802.16e/m (расширение стандарта IEEE 802.16) и E-UTRA (протокол физического и канального уровня технологий связи LTE, являющихся развитием сотовой связи).

Перспективным применением OFDM технологии является современная авиационная связь, включая связь с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА).

В то же время большое число используемых несущих приводит к увеличению пик-фактора сигнала, а требование сохранения ортогональности несущих накладывает жесткие ограничения на точность частотной синхронизации и приводит к увеличению чувствительности OFDM-систем к фазовым шумам опорных генераторов тактовой и несущей частот, доплеровскому рассеянию в канале.

Последнее является одним из основных препятствий на пути применения OFDM в системах мобильной связи, требуя введения большей избыточности для сохранения достоверности передачи данных и снижая тем самым спектральную эффективность.

Широкое применение систем связи на основе техники OFDM не снимает актуальности с разработки алгоритмов оценивания искажений сигнала в канале распространения как в существующих, так и в перспективных разработках.

Среди условий, в которых известные методы оценивания не обеспечивают требуемого качества приема можно отметить каналы распространения сигнала с высоким доплеровским рассеянием при многопозиционной модуляции сигналов, характерные, например, для систем авиационной связи. Основным источником информации для отслеживания быстро изменяющихся свойств канала являются специально зарезервированные каналы, называемые также пилотными.

Также активно разрабатываются методы, использующие для оценивания непосредственно информационные частотные каналы. Поскольку число информационных каналов существенно превышает число пилотных, второй подход за счет большей статистики обеспечивает более высокую точность компенсации амплитудно-фазовых искажений.

Однако, с другой стороны эти алгоритмы характеризуются существенно большей вычислительной сложностью, что затрудняет их применение в системах мобильной связи, а высокая точность оценки в условиях стационарного приема часто оказывается избыточной. Кроме того, использование информационных каналов для оценивания параметров канала исключает применение ряда техник, позволяющих снизить пик-фактор OFDM-сигнала, например активного расширения сигнального созвездия (Active constellation extension, ACE).

В научной литературе обсуждаются различные варианты оценки и компенсации влияния замирающего канала связи. К простейшим из них относятся методы на основе линейной и сплайновой интерполяции оценок, полученных для пилотных каналов, но их применимость ограничивается системами гражданской широкополосной и мобильной связи, в которых простота приемника является одним из ключевых факторов, рассматриваемых при проектировании системы.

Для систем, функционирующих в более жестких условиях распространения сигнала предлагаются алгоритмы оценивания амплитудно-фазовых искажений на основе оптимальной линейной фильтрации. Среди них большое внимание уделяется алгоритмам на основе цифрового фильтра Калмана. Им посвящены работы Исмаилова А.В., Кукушкина Д.С., Колесникова А.В., Крейнделина В.Б., Маслова Е.Н., Иванова А.А., Chen W., Ruifeng Z., H. Hijazi, L. Ros., T. Roman и др.

При этом для оценивания изменений канала распространения в течение OFDM-символа предлагается использовать их линейную, или в более общем случае полиномиальную аппроксимацию.

Многие авторы, основывая свои алгоритмы на оптимальных линейных фильтрах не рассматривают проблему априорной неопределенности статистических характеристик канала, а в случае использования фильтра Калмана – обеспечения устойчивости фильтра.

Каналы распространения сигнала могут характеризоваться большим динамическим диапазоном изменения характеристик: отношения сигнал/шум, доплеровского рассеяния, фактора Райса, и пренебрежение их оцениванием может приводить к существенному снижению точности полученных оценок.

Большое число работ, посвященных решению последней проблемы, относятся к области радионавигации, среди них следует отметить работы А.Н. Mohamed и К.Р. Schwarz. Применительно к OFDM-системам эта проблема рассматривается в работах Р. Vanelli, L. Rugini, R.C. Cannizzaro, A. Soni, T. Sharma, однако, предварительные экспериментальные исследования показывают, что применение описанных в них алгоритмов для оценки параметров канала по пилотным несущим приводит к снижению точности оценки на позициях информационных каналов. В связи с вышеизложенным работа, посвященная демодуляции OFDM сигналов методами дискретного преобразования Фурье является актуальной.

Целью диссертационной работы является синтез эффективных алгоритмов демодуляции OFDM сигналов методами дискретного преобразования Фурье.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. Разобрать структуру OFDM и COFDM сигналов.
2. Разобрать функциональные схемы модулятора и демодулятора
3. Выделить оптимальный способ формирования OFDM радиосигнала.

Для достижения поставленной цели в настоящей диссертационной работе выполнена следующая программа исследований.

1. Разработка методики оценки параметров OFDM сигнала по рабочему сигналу, без использования данных решающей схемы демодулятора.

2. Исследование разработанной методики, включая исследование основных свойств функции потерь, эмпирического функционала и формируемых на их основе оценок.

3. Разработка алгоритма одновременной инвариантной оценки частотного сдвига и границ тактовых интервалов OFDM сигнала.

4. Исследование разработанного алгоритма, включая исследование помехоустойчивости и сравнительный анализ его эффективности по отношению к известным.

5. Разработка алгоритмов восстановления параметров OFDM сигнала, включая алгоритм устранения частотного сдвига, алгоритм восстановления тактовой синхронизации и алгоритм адаптивной коррекции.

6. Исследование помехоустойчивости и вычислительной сложности разработанных алгоритмов.

7. Программная реализация и апробация разработанных алгоритмов в новых технических решениях специализированных цифровых устройств для радиосвязи и радиовещания.

Использованные методы исследований.

Перечисленные задачи были решены методами теории статистической радиотехники, теории оценивания и оптимизации, методами численного анализа и моделирования, линейной аппроксимации, гармонического и спектрального анализа.

При OFDM последовательный цифровой поток преобразуется в большое число параллельных потоков (субпотоков), каждый из которых передается на отдельной несущей.

Основным преимуществом OFDM по сравнению со схемой с одной несущей является ее способность противостоять сложным условиям в канале, например, бороться с затуханием в области ВЧ в длинных медных проводниках, узкополосными помехами и частотно-избирательным

затуханием, вызванным многолучевым характером распространения, без использования сложных фильтров-эквалайзеров.

Канальная эквализация упрощается вследствие того, что OFDM сигнал может рассматриваться как множество медленно модулируемых узкополосных сигналов, нежели как один быстро модулируемый широкополосный сигнал. Низкая символьная скорость делает возможным использование защитного интервала между символами, что позволяет справляться с временным рассеянием и устранять межсимвольные искажения (МСИ).

Частотный разнос  $f$  между соседними несущими  $f_1, f_2 \dots f_n$  в групповом радиоспектре OFDM выбирается из условия возможности выделения в демодуляторе индивидуальных несущих.

При этом возможно применение двух методов частотного разделения (демультиплексирования) несущих. Во-первых, с помощью полосовых фильтров и, во-вторых, с помощью ортогональных преобразований сигналов.

В первом случае частотный разнос между модулированными несущими выбирается таким, чтобы их соседние боковые полосы взаимно не перекрывались. Это условие будет выполнено, если величину частотного разноса выбрать равной  $f > 2/T_U$ , где  $T_U$  - рабочий интервал информационного символа. Однако при этом эффективность использования радиоспектра будет невысокой.

Напротив, стандарт OFDM характеризуется сильным перекрытием спектров соседних поднесущих, что позволяет уменьшить в два раза значение частотного разноса и во столько же раз повысить плотность передачи цифровой информации (бит/с)/Гц.

Благодаря ортогональному методу демодуляции поднесущих группового спектра происходит компенсация помех от соседних частот, несмотря на то, что их боковые полосы взаимно перекрываются.

Для выполнения условий ортогональности необходимо, чтобы частотный разнос между несущими был постоянен и точно равен значению  $\Delta f = 1/T_U$ , то есть на интервале  $T_U$  должно укладываться целое число периодов разностной частоты  $f_2 - f_1$ .

Выполнение этого соотношения достигается введением в модем OFDM двух видов сигналов синхронизации: сигналов для синхронизации несущих

частот группового спектра и сигналов для синхронизации тактовых частот функциональных блоков демодулятора.

Группа несущих частот, которая в данный момент времени переносит биты параллельных цифровых потоков, называется "символом OFDM". Благодаря тому, что используется большое число параллельных потоков, длительность символа в параллельных потоках оказывается существенно больше, чем в последовательном потоке данных.

Это позволяет в декодере задержать оценку значений принятых символов на время, в течение которого изменения параметров радиоканала из-за действия эхо-сигналов прекратятся, и канал станет стабильным.

Таким образом, при OFDM временной интервал символа субпотока  $T_S$  делится на две части - защитный интервал  $T_G$ , в течение которого оценка значения символа в декодере не производится, и рабочий интервал символа  $T_U$ , за время которого принимается решение о значении принятого символа.

Для правильной работы системы эхоподавления необходимо, чтобы защитные интервалы находились в начале символов субпотоков, то есть в защитном интервале продолжается модуляция несущей предшествующим символом.

Технически метод OFDM реализуется путем выполнения инверсного дискретного преобразования Фурье (Fast Fourier Transform, FFT) в модуляторе передатчика и прямого дискретного преобразования Фурье - в демодуляторе приемника приемопередающего устройства.

Диссертационная работа состоит из введения, основной части из 13 подразделов, заключения, списка литературы и приложения.