

Просто о сложном: OFDM-модуляция

Введение

Изучая теорию технологий беспроводных сетей доступа или сетей сотовой связи, неизбежно, так или иначе, можно столкнуться с такой аббревиатурой, как OFDM. Обратившись к википедии, мы обнаружим там следующее: "OFDM ([англ.](#) Orthogonal frequency-division multiplexing) — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, является цифровой схемой модуляции, которая использует большое количество близко расположенных ортогональных поднесущих. Каждая поднесущая модулируется по обычной схеме модуляции (например, квадратурная амплитудная модуляция) на низкой символьной скорости, сохраняя общую скорость передачи данных, как и у обычных схем модуляции одной несущей в той же полосе пропускания. На практике сигналы OFDM получаются путём использования БПФ (быстрое преобразование Фурье)".

Думаю после прочтения данного объяснения для большинства читателей тема OFDM как была непонятной, так ей и осталась. Это неудивительно, поскольку при описании используются довольно нетривиальные и непростые термины. Рядовой читатель спросит, что это еще за ортогональное частотное разделение каналов? Тот, кто хотя бы частично знаком со спектральным анализом может удивиться, откуда здесь взялось быстрое преобразование Фурье?

В данной статье сделана попытка объяснить суть OFDM модуляции простым языком, так сказать "на пальцах" без сильного углубления в математический анализ и теорию цифровой обработки сигналов.

Краткая биография OFDM

Параллельная передача данных с частотным разделением была придумана еще в середине 60-х годов прошлого века и использовалась, как и большинство известных сегодня технологий, сначала только в военных системах. В те времена военные, используя OFDM, уже осуществляли параллельную передачу данных с использованием 34 поднесущих.

В 1980-х стали рассматривать применение OFDM в коммерческих системах: в первую очередь в высокоскоростных модемах и цифровых мобильных сетях. В 1990-х OFDM модуляцию стали использовать в цифровом радиовещании (DAB), в наземном телевидении, при передаче видео высокой четкости HDTV, а также в известных технологиях последней мили ADSL, HDSL.

Долгое время OFDM не находила весьма широкого распространения в других системах связи по причине сложной технической реализации. Решение задачи формирования OFDM сигнала аналоговыми методами весьма проблематично. Развитие вычислительных систем и методов цифровой обработки сигналов позволяет применять сегодня OFDM модуляцию в самых различных системах – от радио до проводных линий и даже волоконно-оптических.

В чем же смысл OFDM?

Несмотря на то, что метод дословно расшифровывается как мультиплексирование с ортогональным частотным разделением, его все-таки в первую очередь относят к методам цифровой модуляции. Дело в том, что метод OFDM использует одновременно и модуляцию и мультиплексирование, но мультиплексирование особенное. Обычное мультиплексирование подразумевает объединение различных сигналов от разных источников, здесь же происходит объединение составных частей одного и того же сигнала.

Постараемся объяснить все на простом примере. Представьте, что нам надо передать из одного пункта в другой стеклянный витраж. Для этого в нашем распоряжении есть некоторый ресурс, допустим 4 тележки (в случае передачи информации в качестве ресурса можно было бы считать доступный для передачи диапазон частот).

В случае OFDM мы разбираем наш стеклянный витраж на некоторое определенное количество частей, для примера пусть их будет 4. Далее каждая тележка перевозит свою часть посылки (витража), при этом тележки катятся одновременно параллельно друг другу. Допустим на пути у нас встречается одна преграда в виде камня (в случае передачи информации – узкополосная помеха). Одна из тележек наезжает на камень, соответственно одна из частей посылки не доходит до пункта приема.

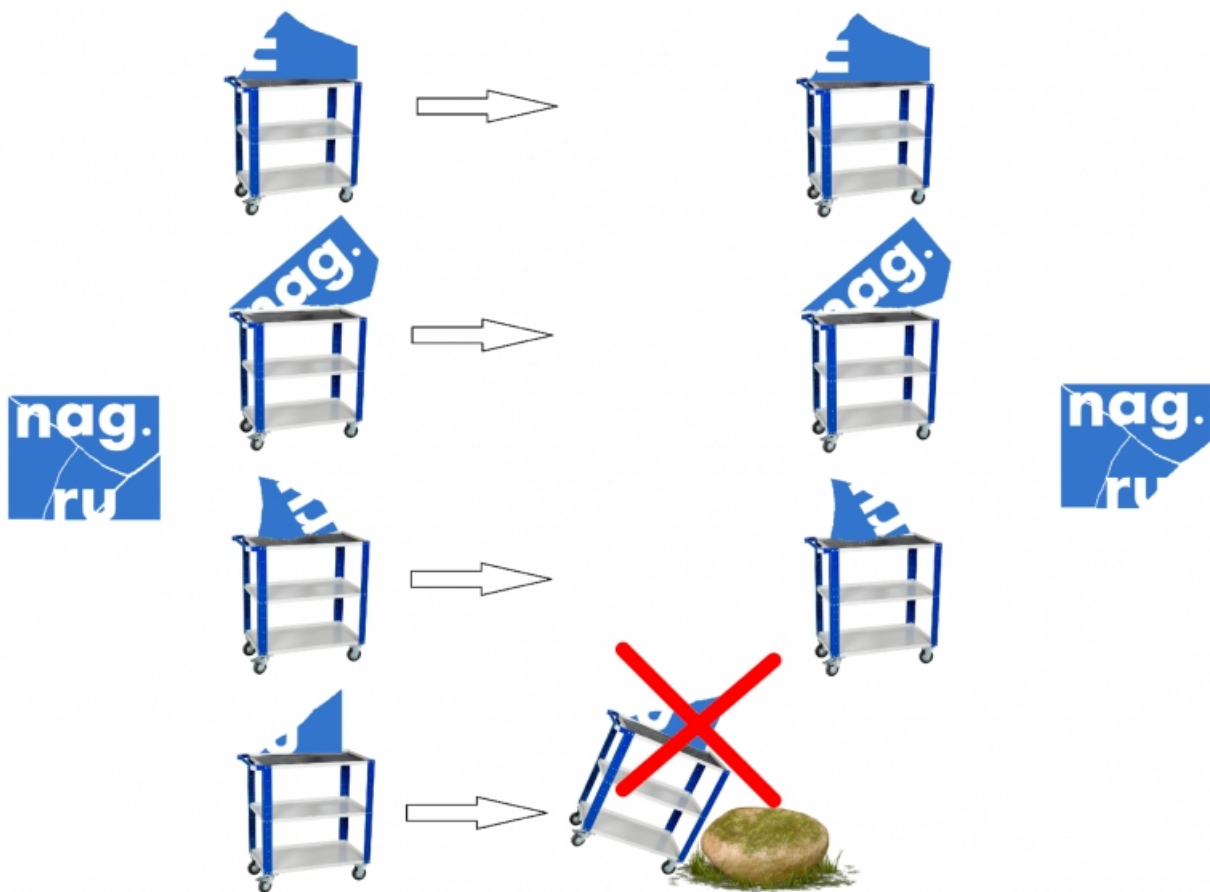


Рис. 1

Однако большее количество частей витража все-таки было корректно получено, поэтому с помощью интуиции и волшебства (помехоустойчивого кодирования), есть шанс восстановить недостающую в результате падения одной тележки часть посылки.

Как бы все было, не применяя OFDM? При традиционном подходе для наискорейшей передачи всей посылки мы также задействуем все доступные ресурсы, но будем транспортировать витраж целиком на всех 4 тележках (используем высокоскоростной метод модуляции, занимающий всю полосу канала). Допустим, на пути у нас также встречается одна преграда в виде камня. В результате одна из тележек наезжает на камень, витраж падает и разбивается вдребезги.

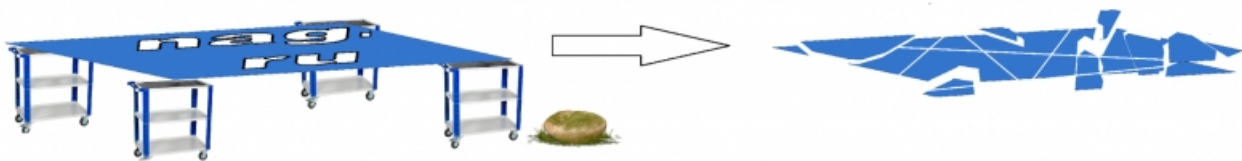
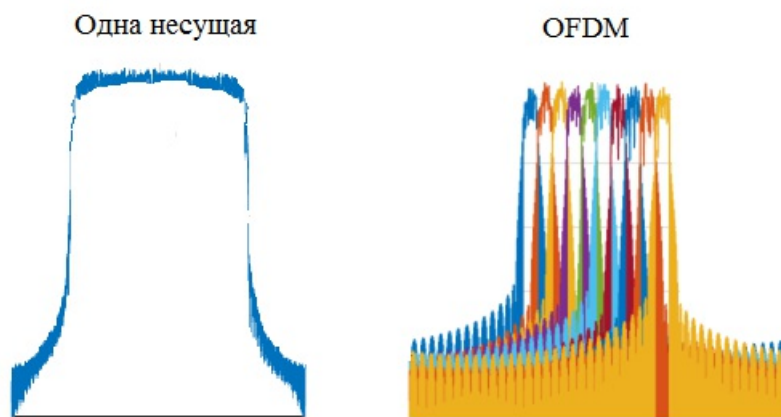


Рис. 2

Алгоритма, по которому в данном случае распался на части наш витраж, мы не знаем, поэтому собрать по кусочкам заново мы его не можем. Итог: целый витраж не доехал до пункта приема (потерян немалый объем данных, здесь даже помехоустойчивое кодирование нас не спасет). Таким образом, можно сказать, что один из основных девизов OFDM: "не надо класть все яйца в одну корзину".



Одной из особенностей OFDM является то, что все тележки могут двигаться параллельно практически вплотную и при этом не мешать друг другу. При передаче информации роль тележек выполняют поднесущие сигналы, т.е. множество несущих колебаний (если забыли, что это такое, почитайте в любом учебнике основы модуляции). Вспомним фильм Терминатор 2 и представим, что тележки сделаны из жидкого металла. В связи с этим даже если при движении пути тележек частично перекрываются, они не мешают друг другу, комфортно сосуществуют вместе и движутся дальше. Существует аналогичный эффект по отношению к передаче сигналов – ортогональность сигналов. Обычно для объяснения термина ортогональность сигналов приводят интегральное математическое выражение. Однако поскольку было дано обещание объяснять все на пальцах, можно просто уяснить следующее. Ортогональные сигналы обладают замечательным свойством – их взаимная энергия равна нулю. Ортогональность поднесущих позволяет на приеме выделить каждую из них из общего сигнала даже в случае частичного перекрытия их спектров. Поскольку поднесущие располагаются вплотную друг к другу и даже частично накладываются друг на друга (см. рис. 3) спектральная эффективность модулированного OFDM сигнала получается высокой.

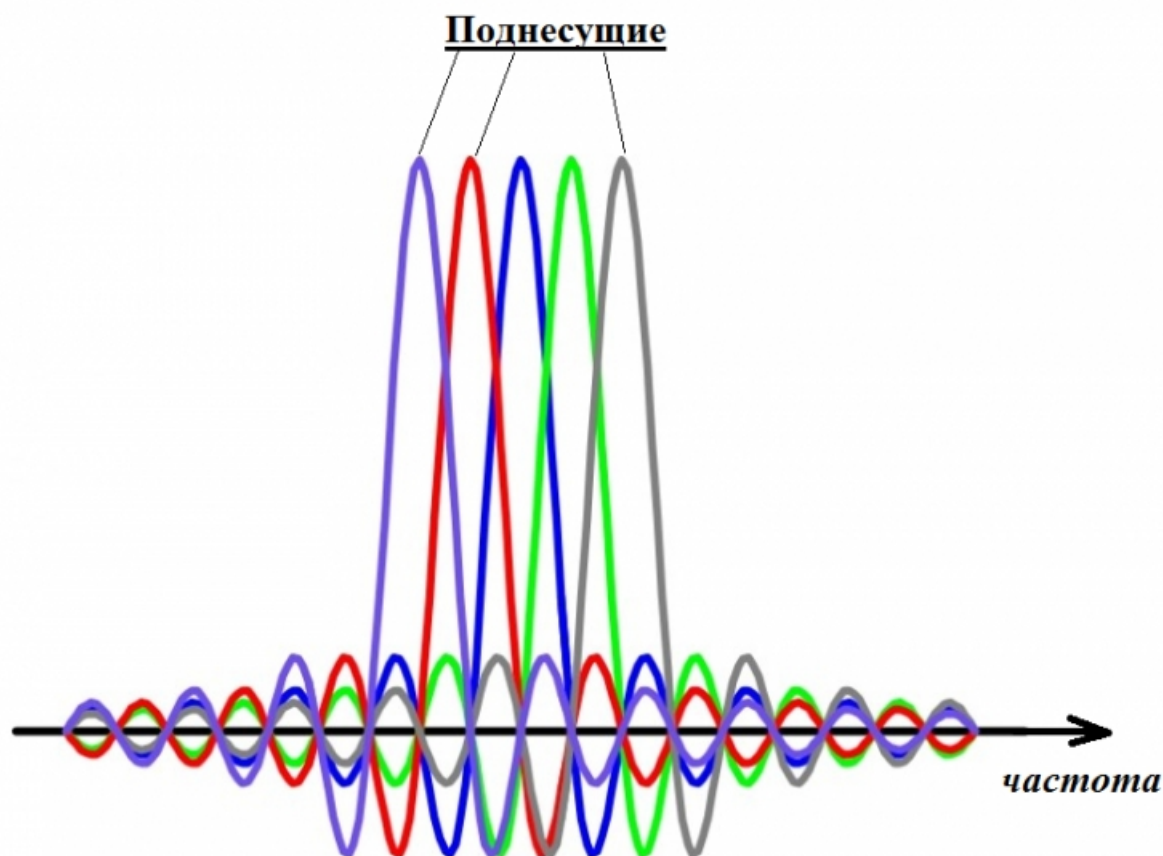


Рис. 3 – Изображение поднесущих на частотной оси

Как видно из рисунка, каждая поднесущая представлена отдельным пиком. Обратите внимание, что в точке пика каждой поднесущей значение остальных поднесущих равно нулю. На оси времени каждой кривой соответствует свой модулированный сигнал. Сумма всех этих сигналов дает сложный по форме OFDM-сигнал.

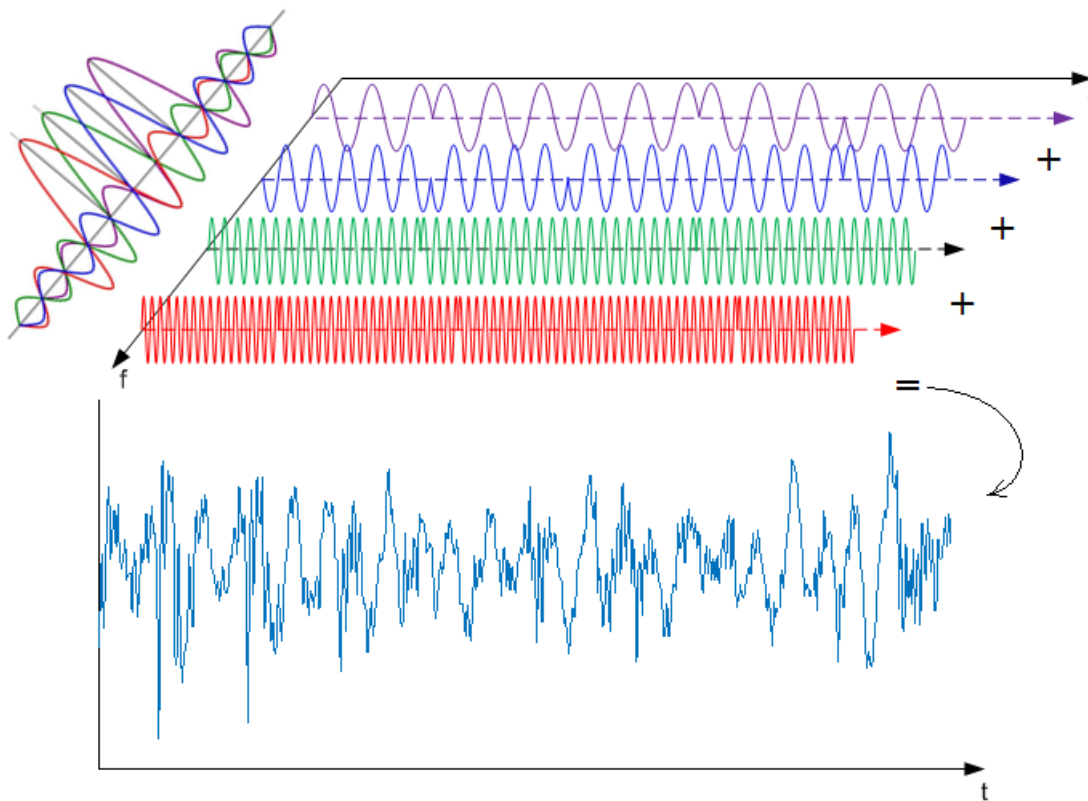


Рис. 4

Параметры поднесущих сигналов (например, синусоид) подбираются таким образом, чтобы они были по отношению друг к другу ортогональны. Для быстрой реализации данного действия с помощью вычислительных устройств используют алгоритм обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ). То есть мы нарочно представляем, что значения сигнала перед блоком ОБПФ относятся к частотной области. Тогда на выходе блока ОБПФ мы получаем значения сигнала на временной оси. Объединяя все значения, мы получаем сложный составной OFDM сигнал.

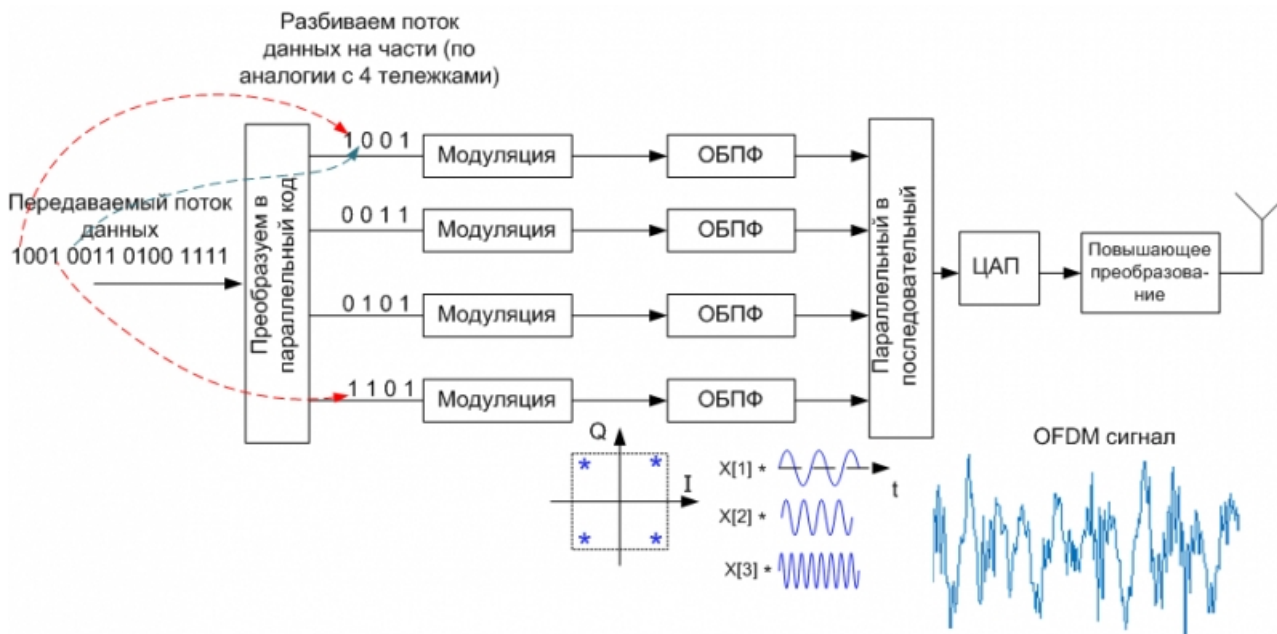


Рис. 5

Важно отметить, что в данной упрощенной схеме представлены не все блоки, имеющиеся в реальных системах с OFDM. Здесь для упрощения схемы не приведены блоки добавления защитных бит и циклического префикса, являющегося неотъемлемой частью технологии.

В виду того, что ОБПФ работает эффективно с массивами размерности 2^k , количество поднесущих выбирается аналогичной кратности. Например, в WiMAX число поднесущих выбирается от 128 до 2048 и может занимать полосы частот от 1,25 МГц до 20 МГц.

Ширина канала	Число поднесущих
1.25 МГц	128
2.5 МГц	256
5 МГц	512
10 МГц	1024
20 МГц	2048

Для каждой из поднесущих используется свой формат модуляции в зависимости от требований и величины помех в канале.

На приемном конце все блоки приведенной выше схемы инвертируются (вместо ЦАП ставится АЦП, вместо обратного БПФ – прямое БПФ) и ставятся в обратном порядке.

В чем же заключается изюминка OFDM, что обусловило его популярность во всех современных системах связи?

Преимущества (добротные изюминки) OFDM:

- способность противостоять сложным условиям в радиоканале, в первую очередь устранять межсимвольную интерференцию и бороться с узкополосными помехами (как в примере мы потеряли одну из тележек и в последующие моменты времени можем пока сменить данный путь с препятствием на другой);
- высокая спектральная эффективность. Если число поднесущих приближается к бесконечности, OFDM системы показывают почти удвоенную спектральную эффективность в сравнении с традиционными системами с частотным разделением каналов.
- адаптивность метода – возможность использования различных схем модуляции для разных поднесущих, что позволяет адаптироваться к условиям распространения сигнала и к различным требованиям к качеству принимаемого сигнала;
- простая реализация методами цифровой обработки (стала простой с развитием мощности вычислительных устройств);
- способность противостоять интерференции между поднесущими, что обуславливает хорошие показатели при многолучевом распространении.

Недостатки OFDM:

- требуется высокоточная синхронизация по времени и по частоте;
- OFDM сигнал имеет относительно высокое значение пик-фактора, что приводит к чрезмерным энергетическим затратам;
- использование защитных интервалов снижает спектральную эффективность метода;
- метод чувствителен к эффекту Доплера, что накладывает дополнительные трудности при его применении в мобильных сетях.

Текущее применение OFDM. На сегодняшний день наиболее известно применение OFDM модуляции в беспроводных системах связи Wi-Fi, WiMax, LTE, в наземных системах цифрового телевидения DVB-T, в системах кабельного телевидения DVB-C, в технологии ADSL и это далеко не все примеры.

Важно отметить, что в данной статье рассмотрены только некоторые основные моменты OFDM. Если вы хотите разобраться в этой теме более серьезно, то стоит обратить внимание также на такие моменты как добавление циклического префикса для устранения помех и борьбы с замираниями, процедуры тактовой и фазовой синхронизации, использование пилотных поднесущих и др.