

## Оценка спектральной эффективности ортогональной многочастотной модуляции

С. Р. Тадевосян\*

Российско-Армянский университет, кафедра телекоммуникации. Армения, 0051, Ереван, ул. О. Эмина, д. 123  
(Статья поступила 14.05.2018; Подписана в печать 31.05.2018)

В данной работе приведен расчет спектров сигналов прямой двоичной модуляции и многочастотной ортогональной модуляции. Проведено сравнение этих спектров. Показано, что передача двоичной последовательности методом многочастотной модуляции приводит к уменьшению уровня внеполосного излучения. Таким образом, удается уменьшить межсимвольную интерференцию, а также переходные помехи в многоканальных системах.

PACS: 84.40.Ua

УДК: 621.376.3

Ключевые слова: ортогональные сигналы, спектральная эффективность, OFDM, SEFDM

### ВВЕДЕНИЕ

Метод параллельной многочастотной передачи данных с частотным разделением был предложен еще в 60-х годах прошлого века и использовался сначала только в специальных системах [1]. В 1980-х OFDM модуляция с успехом была применена в коммерческих системах магистральной связи и некоторых мобильных цифровых сетях. В 1990-х началось внедрение OFDM в цифровое радио- и телевидение (DAB) и при передаче видеосигнала высокой четкости HDTV [2].

Медленное внедрение OFDM в различные системы связи объясняется сложностью технической реализации. Традиционный аналоговый метод реализации путем использования отдельных модуляторов сильно усложнял аппаратуру и ограничивал число частотных подканалов [3]. Развитие вычислительных систем и методов цифровой обработки сигналов дало возможность использовать метод формирования OFDM сигнала путем цифрового обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) [2]. Тем самым, формирование группового сигнала на передающем конце и его разбиение на отдельные сигналы производится цифровым образом. При таком подходе сложность и стоимость процедуры кодирования–декодирования слабо зависят от числа частотных подканалов.

Сегодня OFDM модуляцию применяют в самых различных системах — от радио до проводных линий и даже волоконно-оптических [3]. Модуляция OFDM используется в системах цифрового телевидения, системах сотовой связи WiMAX, MobileWiMAX, MBWA, автоматизированных системах контроля и учета электроэнергии, системах типа «интеллектуальный дом» [4] и др.

Следует также отметить некоторые недостатки OFDM метода:

1. Эффект Доплера, к которому чувствителен OFDM, ограничивает его применение в мобильных системах.

2. Пик-фактор OFDM сигнала, большое значение которого является причиной повышения динамического диапазона выходного усилителя мощности и ведет к уменьшению КПД высокочастотного оборудования.

### 1. ОСОБЕННОСТИ РАДИОКАНАЛОВ

Метод OFDM был разработан для решения проблем, возникающих в радиоканалах при высоких скоростях передачи, свойственных современным системам цифровой передачи.

Проблемы возникают из-за отражений радиосигнала от различных объектов и, как следствие, многолучевого приема [5]. При многолучевом приеме сигнал, падающий на антенну приемника, представляет собой сумму прямого и всех отраженных лучей, то есть происходит интерференция радиосигналов. Мощность суммарного луча может быть как больше, так и меньше мощности слагаемых, в зависимости от соотношения их фаз и поляризаций. Возможны ситуации, когда мощность суммарного луча настолько мала, что связь прерывается. Это явление называется замиранием в радиоканале [5]. Эти замирания селективные, то есть для разных частот проявляются по-разному. В случае высокоскоростного цифрового канала, ширина спектра которого велика, селективные замирания приводят к искажению спектра сигнала, то есть к ухудшению его восстановления на приемном конце.

Однако в цифровом канале проблемы этим не ограничиваются. В случае многолучевого распространения отраженные лучи приходят с временным запаздыванием, величина которого сравнима или даже много больше длительности символа (рис. 1).

Мощности лучей могут быть сравнимы, так что в приемнике складываются информационные последовательности с различными временными сдвигами, то есть происходит межсимвольная интерференция (МСИ).

\*E-mail: [tad.sus.94@gmail.com](mailto:tad.sus.94@gmail.com)

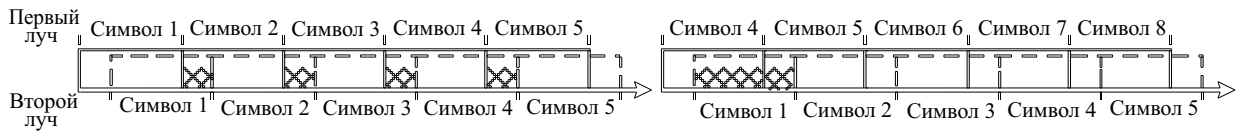


Рис. 1: МСИ малая и большая. Область наложения выделена

## 2. ПРИНЦИП OFDM

OFDM представляет собой метод модуляции цифрового потока путем разбиения его на  $N$  параллельных потоков и модуляции их на взаимно ортогональных несущих [6]. Как видно из рис. 2, при разбиении исходного потока скорость передачи информации в каждом канале уменьшается в  $N$  раз, и соответственно, в  $N$  раз увеличивается длительность сигналов в подканалах. Число  $N$  можно выбрать так, чтобы длительность сигналов оказалась много больше задержек, что существенно уменьшает МСИ.

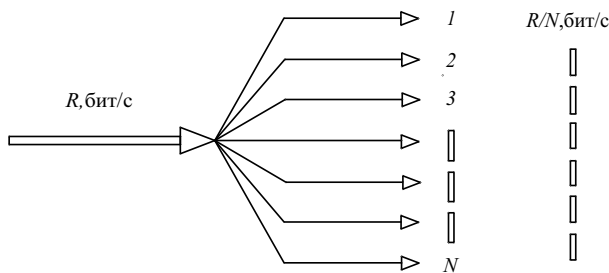


Рис. 2: Принцип разбиения цифрового потока

Для эффективного использования полосы частот канала, распределенного на подканалы, нужно, насколько можно плотнее расположить их друг к другу. А для достижения полной независимости несущих друг от друга, несущие сигналы, должны быть ортогональными. Минимальная разность частот между несущими, при которой сигналы ортогональны, достигается при  $\Delta f = 1/T$ , где  $T$  — длительность рабочего интервала информационного символа. При этом ширина спектра OFDM сигнала получается приблизительно равной ширине спектра сигнала прямой модуляции. В результате, спектр сигнала OFDM принимает вид, показанный на рис. 3. Несмотря на частичное перекрытие частотных подканалов, ортогональность несущих сигналов обеспечивает независимость каналов друг от друга и, следовательно, отсутствие межканальной интерференции. В данном случае нарушение приема из-за селективных замираний происходит одновременно лишь в некоторых каналах, что в меньшей степени влияет на качество приема, чем искажение спектра в случае модуляции с одной несущей.

Таким образом, применение OFDM помогает в борьбе с двумя основными трудностями, возникающими при передаче высокоскоростного цифрового сигнала по радиоканалу.

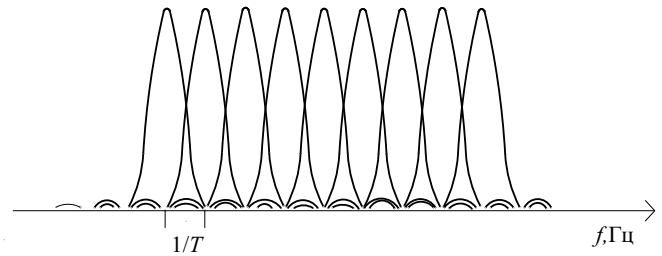


Рис. 3: Структура энергетического спектра сигнала OFDM

Формирование сигнала OFDM можно провести двумя способами. Если число используемых несущих мало, то применяется метод с использованием  $N$  модуляторов [?]. Этот метод применим при небольшом числе поднесущих. В большинстве современных системах с OFDM число поднесущих велико. Так, например в цифровом TV сигнале их число доходит до нескольких тысяч [2]. При таком большом числе каналов невозможно реализовать OFDM путем построения модуляторов для каждой частоты, т.к. система становится очень громоздкой и дорогой. В современных системах применяется способ реализации такой системы путем цифрового обратного преобразования Фурье (ОБПФ) [6].

## 3. ЗАЩИТНЫЙ ИНТЕРВАЛ

В данном методе модуляции вводится защитный интервал. Следствием является то, что при OFDM время, используемое для передачи одного символа, состоит из двух частей: защитный интервал, в течение которого не производится оценка значения символа и длительность полезного сигнала. Для обеспечения правильной работы системы, защитный интервал должен находиться в начале символа. Таким образом, защитный интервал является копией ее последующей части.

От выбора длительности защитного интервала зависит степень помехоустойчивости к эхо-сигналам (отраженные сигналы). Если временная задержка эхо-сигнала не превышает длительность защитного интервала сигнала, который дошел до точки приема без преотражения, то искажения, вызванные МСИ, не повлияют на полезную информацию. При задержке выходящей за рамки защитного интервала защита информации не обеспечивается. Ее длительность не должна превышать 25% от времени полезного символа.

#### 4. РАСЧЕТ ВНЕПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СИГНАЛА OFDM

Спектральная плотность мощности двоичного сигнала с одной несущей определяется следующей формулой:

$$S(f) = T \left[ \frac{\sin(\pi f T)}{(\pi f T)} \right]^2,$$

где  $T$  — период передаваемой последовательности.

При формировании OFDM сигнала первичный сигнал разбивается на  $N$  параллельных потоков и период каждого из этих потоков в  $N$  раз больше, чем в исходном. Следовательно, спектральная плотность мощности сигнала каждого подканала выражается ниже приведенной формулой:

$$S_N(f) = NT \left[ \frac{\sin(\pi f NT)}{\pi f NT} \right]^2.$$

На рис. 4 представлены графики спектральной плотности мощности сигнала  $S(f)$  (красный) и OFDM сигнала (синий), то есть суммы  $S_N(f)$  сигналов подканалов, несущие частоты которых смещены на величину  $\Delta f = 1/NT$ . Из графика видно, что оба спектра занимают приблизительно одинаковые частотные полосы, однако спектр сигнала OFDM имеет более крутые спады. На рисунке отмечены частоты  $F_B$  и  $F_H$ , которые можно считать верхней нижней границами частотной полосы занимаемой сигналом OFDM. Вместе с тем, видно, что такая полоса недостаточна для передачи сигнала с одной несущей.

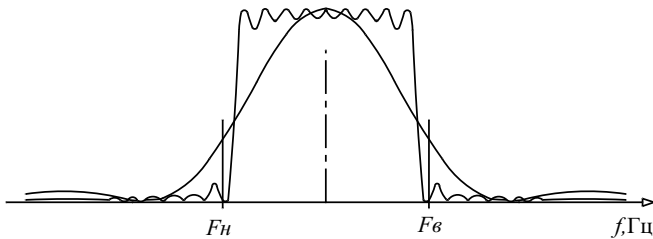


Рис. 4: Графики спектральных плотностей мощности сигналов OFDM и с одной несущей

Для подтверждения данного вывода в Mathcad-е были проведены расчеты внеполосной и внутриполосной мощности излучения обоих сигналов.

Внутриполосная мощность излучения OFDM сигнала при использовании одной несущей соответственно равны

$$E_{in} = \int_{F_H}^{F_B} S(f)df, \quad E_{N_{in}} = \int_{F_H}^{F_B} S_{OFDM}(f)df.$$

Для расчета внеполосной мощности излучения имеем

соответственно выражения:

$$E_{N_{out}} = 2 \int_{F_B}^{\infty} S_{OFDM}(f)df, \quad E_{out} = 2 \int_{F_B}^{\infty} S(f)df.$$

Относительная мощность внеполосного и внутриполосного излучений для сигналов с одной несущей и  $N$  несущими определяется соответственно:

$$E_{rel} = \frac{E_{out}}{E_{in}}, \quad E_{Nrel} = \frac{E_{N_{out}}}{E_{N_{in}}}.$$

Для сравнения методов модуляции OFDM и с одной несущей были проведены вычисления и построен график рис. 5 зависимости отношения относительных мощностей внеполосного и внутриполосного излучения этих сигналов  $E_0/E_{N_0}$  от числа каналов  $N$ .

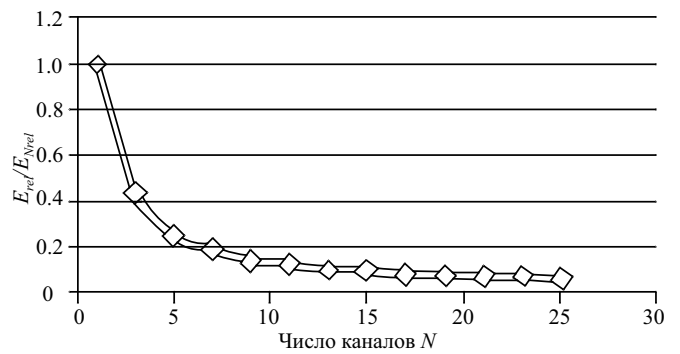


Рис. 5: График зависимости  $E_0/E_{N_0}$  от числа каналов  $N$

При увеличении числа подканалов в OFDM мощность внеполосного излучения резко уменьшается по отношению к мощности внеполосного излучения модуляции с одной несущей.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ спектров сигналов OFDM и модуляции с одной несущей показал, что спектр сигнала OFDM уже. Расчет показал также, что переход от модуляции с одной несущей к OFDM снижает уровень внеполосного излучения. Получена убывающая зависимость относительной мощности внеполосного излучения по отношению к модуляции с одной несущей от числа подканалов OFDM. Уже при числе подканалов порядка 25 получаем уменьшение внеполосного излучения в 20 раз.

По приведенным расчетам можно сделать вывод, что переход к OFDM позволяет не только эффективно бороться с замираниями и многолучевым приемом, но и уменьшить межсимвольную интерференцию, а также переходные помехи в многоканальных системах.

Автор выражает благодарность профессору, доктору физ-тех. наук В.Г. Аветисяну, доценту, канд. физ-тех. наук А.В. Дарьяну.

- 
- [1] *Прокис Дж.* Цифровая связь. Пер. с англ./ Под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. Documents/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%2015.pdf.  
[2] *Папян С. Р.* Основы ТВ и радио: Курс лекций. Ер.: РАУ, 2016. [5] Эл. источник: <http://celnet.ru/probrad.php>.  
[3] *Zhao J.* Opt. Exp. 2014. **22**. P. 1114. [6] <http://www.konturm.ru/newsprint.php?id=help/stat290805>  
[4] Эл. источник: <http://www.its.kpi.ua/subjects/22/>
- 

## Spectrum efficiency estimation of the orthogonal multi-frequency modulation

**S. Tadevosyan**

*Department of telecommunication, Russian–Armenian University. Yerevan, Armenia  
E-mail: [tad.sus.94@gmail.com](mailto:tad.sus.94@gmail.com)*

In this work, the spectra of the direct binary modulation and the orthogonal multi-frequency modulation are calculated. It is shown that binary sequence transmission by the method of multi-frequency modulation reduces the out-of-band radiation. Thus, decreases the inter-symbol interference as well as the transition noise in multi-channel systems.

PACS: 84.40.Ua

*Keywords:* orthogonal signals, spectrum efficiency, OFDM, SEFDM.

*Received 14 May 2018.*

### Сведения об авторе

Тадевосян Сусанна Рафиковна — магистрант, радиоинженер в альянс-партнере «National Instruments» «10X Engineering»; тел.: (374) 94-808-809, e-mail: [tad.sus.94@gmail.com](mailto:tad.sus.94@gmail.com).

---