

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ OFDMA

© 2017 А. П. Преображенский, О. Н. Чопоров

Воронежский институт высоких технологий (г. Воронеж, Россия)

Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия)

В настоящее время среди широкополосных сигналов популярными стали алгоритмы модуляции с ортогональным частотным уплотнением (OFDM) и модуляции с параллельными составными ортогональными сигналами (OCDM). В данной работе дан анализ технологии OFDMA.

Ключевые слова: кодирование информации, фильтрация, модуляция.

В середине 60-х годов XX века Роберт Чанг из компании Bell Labs предложил для формирования параллельных частотных каналов использовать ортогональные несущие, что позволило при сохранении скорости передачи сократить полосу сигнала примерно в два раза и одновременно упростить реализацию системы, отказавшись от гребенки полосовых фильтров. Данная технология получила название OFDM – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing.

Ортогональными на интервале времени T являются гармонические несущие, периоды которых кратны T и взаимно кратны друг другу, т. е. для любой пары $i, j, i \neq j$, выполняются условия:

$$\frac{T}{T_i} = n, \frac{T}{T_j} = m, \left(\frac{T_i}{T_j} \text{ или } \frac{T_j}{T_i} \right) = k, \quad (1)$$

где n, m, k - целые числа.

Например, такой ряд кратных несущих образуют гармонические колебания с периодами $T, \frac{T}{2}, \frac{T}{4}, \frac{T}{8}, \dots$. Заметим, что данный набор гармонических колебаний образует базис преобразования Фурье, что и используется при реализации OFDM в современных телекоммуникационных системах.

Технология OFDM в различных модификациях используется в самых разных телекоммуникационных системах, например:

Проводные системы:

- системы широкополосного доступа ADSL и VDSL;
- домашние сети MoCA (Multimedia over Coax Alliance);
- система кабельного цифрового телевидения DVB-C2;

Беспроводные системы:

- беспроводные локальные сети IEEE 802.11a,g,n и HIPERLAN/2;

- системы цифрового радиовещания DAB/EUREKA 147, DAB+, HD Radio, T-DMB и ISDB-TSB;

- системы цифрового телевидения DVB-T и ISDB-T;

- системы мобильного телевидения DVB-H, T-DMB, ISDB-T;

- система широкополосного беспроводного доступа FLASH-OFDM;

- система широкополосного доступа LTE;

- система широкополосного доступа WiMAX.

Упрощенная блок-схема системы связи с OFDM показана на рисунке 1.

Символы модуляции, предназначенные для передачи, объединяют в блок из N символов и подают на вход обратного дискретного преобразования Фурье. Полученный блок данных последовательно передается в канал. Сигнал $s(t)$ во временной области называют OFDM символом. На приемной стороне данные, полученные из канала за время OFDM символа, преобразуют в параллельный блок из N комплексных чисел и подают на вход дискретного преобразования Фурье. Полученный блок данных с выхода DFT последовательно передают на демодулятор. В упрощенной схеме на рисунке 1 не рассмотрены вопросы временной синхронизации и оценки канала, к которым мы вернемся в дальнейшем.

В настоящее время технология OFDM реализуется с двумя важными усовершенствованиями:

- периодическое продолжение OFDM символов;

- безразрывная сшивка OFDM символов.

Периодическое (циклическое) продолжение сигнала позволяет от ограничения $N \cdot T \gg \max(\tau_i)$ перейти к более мягкому требованию $N \cdot T > \max(\tau_i)$ и при этом полностью подавить межсимвольную интерференцию.

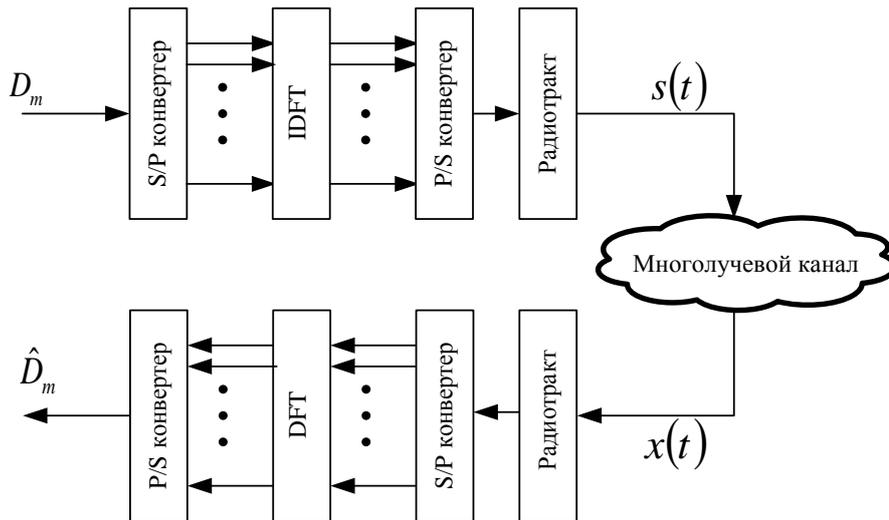


Рисунок 1. Упрощенная блок-схема системы связи с OFDM.

Символы модуляции, предназначенные для передачи, объединяют в блок из N символов и подают на вход обратного дискретного преобразования Фурье. Полученный блок данных последовательно передается в канал. Сигнал $s(t)$ во временной области называют OFDM символом. На приемной стороне данные, полученные из канала за время OFDM символа, преобразуют в параллельный блок из N комплексных чисел и подают на вход дискретного преобразования Фурье. Полученный блок данных с выхода DFT последовательно передают на демодулятор. В упрощенной схеме на рисунке 1 не рассмотрены вопросы временной синхронизации и оценки канала, к которым мы вернемся в дальнейшем.

В настоящее время технология OFDM реализуется с двумя важными усовершенствованиями:

- периодическое продолжение OFDM символов;
- безразрывная сшивка OFDM символов.

Периодическое (циклическое) продолжение сигнала позволяет от ограничения $N \cdot T \gg \max(\tau_i)$ перейти к более мягкому требованию $N \cdot T > \max(\tau_i)$ и при этом полностью подавить межсимвольную интерференцию.

Будем считать блок из N комплексных символов модуляции на входе IDFT спектром $\hat{S}(\omega)$ некоторого сигнала $s(t)$. Пусть сигнал $s(t)$ прошел через многолучевой канал, так, что на входе приемника наблюдается сигнал $x(t)$, полученный в соответствии с выражением

$$x(t) = \sum_i A_i \cdot s(t - \tau_i) + n(t) \quad (1)$$

Найдем спектр сигнала $x(t)$.

$$X(\omega) = F[x(t)] = F[\sum_i A_i \cdot s(t - \tau_i) + n(t)] = \sum_i A_i \cdot F[s(t - \tau_i)] + N(\omega). \quad (2)$$

Если интервал вычисления преобразования Фурье (длительность OFDM символа)

$T \gg \max(\tau_i)$, то в соответствии с (3) можно приближенно применить (4).

$$x(t) \approx \text{Re}([\sum_i A_i \cdot e^{i \cdot \varphi_i}] \cdot D_T(t) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t}) + n(t). \quad (3)$$

$$X(\omega) \approx [\sum_i A_i \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot \tau_i}] \cdot S(\omega) + N(\omega). \quad (4)$$

Другими словами, ортогональность символов модуляции сохраняется с хорошим приближением при $T \gg \max(\tau_i)$, но если условие $T \gg \max(\tau_i)$ не выполняется, то межсимвольной интерференции избежать не удастся.

Заметим, что если бы сигнал $s(t)$ был бы периодическим с периодом T , то выражение

было бы справедливо при любом соотношении между T и τ_i в силу известного свойства преобразования Фурье, связывающего временной сдвиг периодического сигнала с фазовым сдвигом его спектральных компонентов. Практическим решением является построение циклического продолжения сигнала $s(t)$ при его передаче в канал.

$$X(\omega) \approx \left[\sum_i A_i \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot \tau_i} \right] \cdot S(\omega) + N(\omega) \quad (5)$$

Циклическое продолжение сигнала $s(t)$ строится на интервале времени $\Delta T >$

$$\Delta T \quad (6). s_c(t) = s \left((T - \Delta T) + t - \left\lfloor \frac{(T - \Delta T) + t}{T} \right\rfloor \cdot T \right), \quad (6)$$

где $\lfloor x \rfloor$ – округление числа x в меньшую сторону до ближайшего целого числа.

Из практических соображений, при проектировании реальных систем выбирают $\Delta T \sim 2 \cdot \max(\tau_i)$, $T \sim 10 \dots 30 \cdot \Delta T$. Тогда циклическое продолжение сводится к передаче перед сигналом $s(t)$ небольшого его завершающего фрагмента, как показано на рисунке 2. Такое циклическое продолжение называют циклическим префиксом.

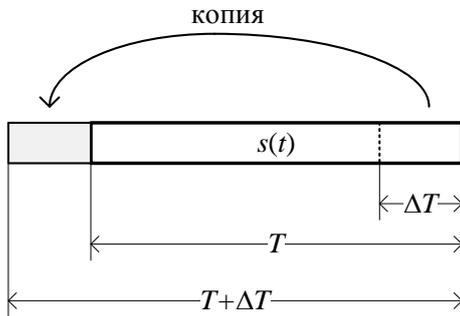


Рисунок 2. Процесс формирования циклического префикса.

При этом важно отметить, что на приемной стороне для получения оценок $\hat{D}(\omega)$ используют фрагмент принятого сигнала длительностью T , в то время как передают сигнал длительностью $T + \Delta T$. Таки образом, использование циклического префикса приводит к энергетическим потерям $10 \cdot \lg \left(\frac{T + \Delta T}{T} \right)$ дБ. В реальных системах эти потери достигают 0.3 дБ и являются платой за подавление межсимвольной интерференции.

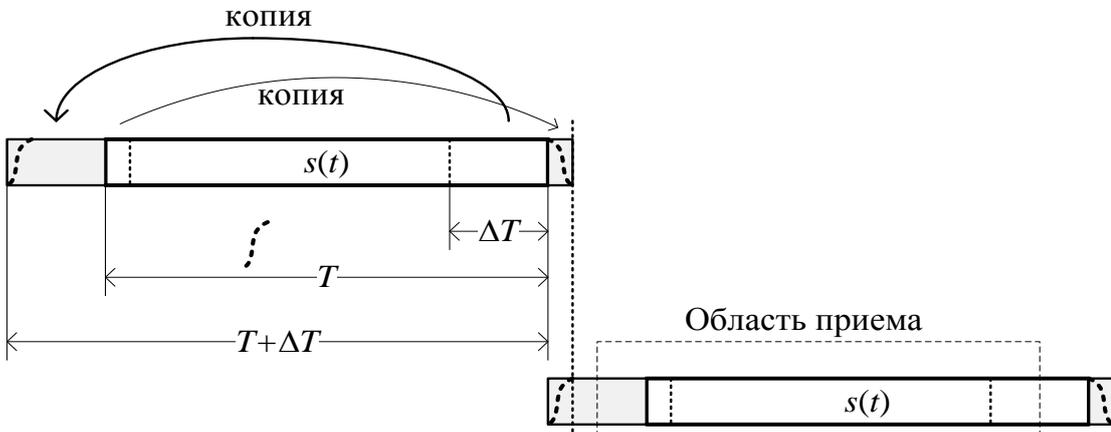


Рисунок 3. Процесс сшивания OFDM символов.

$\max(\tau_i)$. Для построения циклического продолжения $s_c(t)$ сигнал $s(t)$ просто повторяется на интервале

Рассмотрим теперь проблему сшивки OFDM символов.

Поскольку передаваемые данные D_m в общем случае независимы в каждом OFDM символе, на границах OFDM символов неизбежно будут возникать разрывы сигнала, расширяющие его спектр. Для безразрывной сшивки OFDM символов используют следующий прием. Формируют для каждого символа на коротком интервале циклическое продолжение (постфикс). Затем накладывают на постфикс окно, например, в форме приподнятого косинуса, обеспечивающее плавное затухание уровня сигнала до нуля. На начало циклического префикса следующего OFDM накладывается аналогичное окно, обеспечивающее плавное нарастание уровня сигнала до номинального. Предыдущий и последующий OFDM символы располагают с перекрытием по времени (рис. 3) и суммируют.

Таким образом, ликвидируются разрывы сигнала на границе OFDM символов и спектр передаваемого сигнала не расширяется. Заметим, что если на приемной стороне для вычисления DFT брать фрагмент сигнала, выделенный пунктирной рамкой на рисунке 3, то наличие постфикса и процедуры сшивки OFDM символов никак не скажется на приеме сигнала. Кроме того, в начале и в конце принимаемого OFDM символа оказывается сигнал одинаковой формы (длительностью $\frac{\Delta T}{2}$ с каждой стороны), что может использоваться для временной синхронизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешкина Е. В. О применении методов кодирования информации / Е. В. Алешкина // Международный студенческий научный вестник. – 2017. – № 4-5. – С. 710-713.
2. Баутин И. А. Модели распространения радиосигнала WI-FI / И. А. Баутин, А. Г. Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2017. – № 2 – (21). – С. 107-112.
3. Беспалов М. С. Функции Уолша и их приложения: Учебное пособие / М. С. Беспалов, В. А. Скляренко. – Владимир. 2012.
4. Вековищева К. В. Исправляющая способность некоторых кодов / К. В. Вековищева, В. В. Костюченко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2017. – № 1 (16). – С. 9.
5. Вековищева К. В. Распознавание изображений сигналов, имеющих сложную форму / К. В. Вековищева, В. В. Костюченко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2017. – № 1 (16). – С. 17.
6. Гусев А. В. Алгоритм спектрально-временного анализа сигналов телекоммуникационных систем в устройствах вычислительной техники / А. В. Гусев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2017. – № 1 (16). – С. 11.
7. Ерасов С. В. Проблемы электромагнитной совместимости при построении беспроводных систем связи / С. В. Ерасов // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2013. – № 10. – С. 137-143.
8. Казаков Е. Н. Разработка и программная реализации алгоритма оценки уровня сигнала в сети WI-FI / Е. Н. Казаков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2016. – № 1 (12). – С. 13.
9. Кульнева Е. Ю. О характеристиках, влияющих на моделирование радиотехнических устройств / Е. Ю. Кульнева, И. А. Гащенко // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-2. – С. 50.
10. Львович И. Я. Применение методологического анализа в исследовании безопасности / И. Я. Львович, А. А. Воронов // Информация и безопасность. – 2011. – Т. 14. – № 3. С. 469-470.
11. Милошенко О. В. Методы оценки характеристик распространения радиоволн в системах подвижной радиосвязи / О. В. Милошенко // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2012. – № 9. – С. 60-62.
12. Мишин Я. А. О системах автоматизированного проектирования в беспроводных сетях / Я. А. Мишин // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2013. – № 10. – С. 153-156.
13. Нечаев М. И. Проблемы моделирования процессов в компьютерных сетях / М. И. Нечаев // Международный студенческий научный вестник. – 2017. – № 4-10. – С. 1528-1531.
14. Паньчев А. И. Моделирование влияния ошибок размещения элементов антенны на погрешность корреляционного интерферометрического радиопеленгатора / А. И. Паньчев, А. В. Максимов, А. А. Ваганова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2017. – № 3 (18). – С. 4.
15. Хармут Х. Ф. Теория секвентного анализа / Х. Ф. Хармут; Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 576 с.

THE CHARACTERISTICS OF OFDMA TECHNOLOGY

© 2017 A. P. Preobrazhensky, O. N. Choporov

Voronezh Institute of High Technologies (Voronezh, Russia)
Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)

Currently, among the broadband signals have become very popular algorithms of modulation with orthogonal frequency seal (OFDM) modulation and parallel composite orthogonal signals (OCDM). In this work the analysis of OFDMA technology.

Key words: information coding, filtering, modulation.