

## МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ (OFDM)

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Ковальчук Е.Н., Савельев М.Г.

Карпушкин Э.М. – канд. техн. наук, доцент

В последнее время все активнее ощущается рост беспроводных систем связи. Развитие технологий мобильных устройств, беспроводных локальных сетей (WLAN) и стремительный рост сети Интернет вызывают все возрастающую потребность в увеличении емкости мобильных сетей. Также наблюдается все большая интеграция сотовых сетей с сетями передачи данных, например GPRS в GSM сетях, а также сети 3G. Однако существующие технологии не могут удовлетворить новых потребностей по емкости сети, скорости передачи и стоимости услуг. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) - ортогональное частотное мультиплексирование - это схема модуляции, которая позволяет быстро и эффективно передавать данные даже в каналах с многолучевым распространением сигнала. Передача ведется одновременно на большом количестве несущих частот. Эти несущие имеют небольшое разнесение по частоте и их спектры образуют групповой спектр OFDM сигнала. Частотное разнесение и синхронизация подобраны так, чтобы несущие были ортогональны между собой, то есть не оказывали влияния друг на друга, несмотря на перекрытие по спектру.

Передача информации посредством сигналов с ортогональным частотным и пространственным разделением стала стандартом для многих современных радиосистем в связи с рядом преимуществ, к которым относятся высокая спектральная эффективность, низкий уровень межсимвольной интерференции, высокое качество передачи в условиях частотно-селективных замираний.

На рисунке 1 представлена обобщенная структура системы связи с ортогональным частотным мультиплексированием.

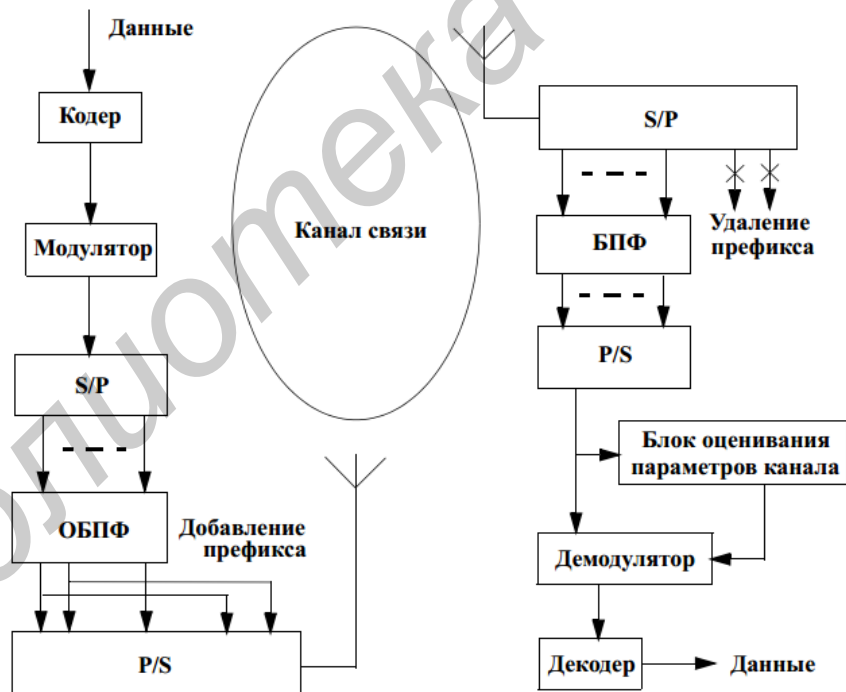


Рис. 1 – Структура системы связи с ортогональным частотным мультиплексированием

Данные пользователя вначале поступают в блок помехоустойчивого кодирования, а затем на модулятор. После модуляции данные в виде комплексных символов поступают в блок обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ), где происходит формирование сигнала OFDM с использованием  $M$  поднесущих. Символ OFDM состоит из основной информационной части и циклического префикса, который формируется путем копирования последних  $L$  отсчетов в начало кадра. Далее последовательность символов OFDM преобразуется в аналоговый сигнал и передается по каналу связи. Длительность циклического префикса выбирается таким образом, чтобы быть больше, чем длительность импульсного отклика канала связи. Таким образом, символ OFDM имеет длительность  $(M+L)T_0$ , где  $T_0$  - период дискретизации в системе.

На приемной стороне, сигнал после дискретизации и удаления префикса поступает в блок быстрого преобразования Фурье (БПФ), где осуществляется демодуляция сигнала *OFDM*. После преобразования параллельного потока символов в последовательный, символы поступают в демодулятор, а также в блок оценивания параметров канала. Оценки параметров канала необходимы для работы демодулятора, поэтому выход блока оценивания параметров канала соединен с демодулятором. Дальнейшие преобразования сигнала зависят от структуры конкретной системы и не относятся к основной концепции *OFDM*. В реальных условиях работы системам беспроводной подвижной связи с *OFDM* приходится работать в условиях, когда в канале связи сигнал подвергается воздействию замираний. Поэтому для получения приемлемой помехоустойчивости требуется использование помехоустойчивого кодирования.

На выходе передатчика системы *OFDM* модель сигнала  $s(t)$  выглядит следующим образом:

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m x_m \exp\{j\omega_m t\}, \quad (1)$$

где  $M$  – число поднесущих;  $\omega_m$  – частота  $m$ -й поднесущей,  $A_m$  – комплексный коэффициент канала, соответствующий  $m$ -й поднесущей;  $x_m$  – комплексный информационный символ, соответствующий  $m$ -й поднесущей.

Модель сигнала на входе приемника системы *OFDM* с учетом многолучевого распространения радиоволн, примет вид:

$$y_n = \sum_{m=0}^{M-1} g_m x_m \exp\{j\omega_m n T_0\} + \eta_n; \quad n = 1 \dots N, \quad (2)$$

$$g_m = A_m \sum_{q=1}^Q \lambda_q \exp\{-j\omega_m \tau_q\}, \quad (3)$$

где  $g_m$  – комплексная амплитуда поднесущей на входе приемника;  $Q$  – число лучей;  $\lambda_q$  – комплексный коэффициент канала, соответствующий  $q$ -му лучу;  $\tau_q$  – задержка, соответствующий  $q$ -му лучу;  $\eta(t)$  – шум наблюдения, который является комплексным гауссовским случайным процессом с нулевым средним и равномерной спектральной плотностью;  $N$  – число временных отсчетов.

В то же время системы передачи, использующие данный тип сигналов, очень чувствительны к фазовой нестабильности несущей. Последняя может быть вызвана нестационарностью фазовой характеристики канала, обусловленной доплеровским рассеянием, фазовыми флуктуациями опорных генераторов на передающей и приемной сторонах. Проблема стоит особенно остро в каналах с многопозиционной модуляцией сигналов. Действие фазовых флуктуаций может быть скомпенсировано системой коррекции фазы следящего типа на основе многомерного фильтра Калмана.

Важный подход, позволяющий существенно улучшить спектральную эффективность и помехоустойчивость системы – применение разнесения как на передающей, так и на приемной стороне путем использования нескольких передающих и нескольких приемных антенн (*MIMO*). Эта технология уже применяется в некоторых современных стандартах, например *IEEE 802.16* и *LTE*.

Список использованных источников:

1. Карпушкин, Э. М. Радиосистемы передачи информации / Э. М. Карпушкин // Уч. метод. пособие для студентов учреждений, обеспечивающих получение высшего образования по специальности "Радиоэлектронные системы". – Минск, 2008. – 62 с.
2. Чердынцев, В. А. Теория систем радиоэлектронной защиты информации / В. А. Чердынцев, Дубровский В.В. // Уч. метод. пособие для специальности 1-390104 «Радиоэлектронная защита информации». – Минск, 2009. – 131 с.
3. Сергиенко А. Б., Цифровая обработка сигналов, - СПб.: Питер, 2003.
4. Тихонов В.И., Шахтарин Б.И., Сизых В.В. Случайные процессы. Примеры и задачи. Т.1. Случайные величины и процессы: учеб. пособие для вузов, - М.: Радио и связь, 2003.