

ОПТИМАЛЬНЫЙ ПРИЕМ СИГНАЛОВ OFDM С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБУЧАЮЩИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

М.С. Лохвицкий, доцент кафедры «Теории вероятностей и прикладной математики» МТУСИ, к.т.н., e-mail: msl2@mtuci2.ru

УДК 621.396

Аннотация. Рассмотрена проблема межсимвольной интерференции, возникающей при многолучевом распространении сигналов в сотовой связи. Основным методом мультиплексирования сигнала в современных телекоммуникациях является OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – множественный доступ с ортогональным частотным разделением каналов), который позволяет эффективно бороться с многолучевостью. В статье предлагается не бороться с многолучевостью, а использовать все лучи при приеме сигнала. Для этого следует оценивать импульсный отклик канала по обучающей последовательности, а затем при приеме сигнала, сравнивать его с формируемыми в приемнике образцами отклика на всю входную последовательность импульсов. Решение принимается в пользу образца, имеющего наибольшую корреляцию с входной последовательностью.

Ключевые слова: Wi-Fi; WiMax; LTE; McWILL; OFDM.

OPTIMAL RECEPTION OF OFDM SIGNALS USING A TRAINING SEQUENCE

Mikhail Lohvitsky, associate professor of the "Probability theory and applied mathematics" department, candidate of technical sciences, MTUCI

Annotation. The problem of intersymbol interference arising in the case of multipath signal propagation in a cellular communication is considered. The main method of signal multiplexing in modern telecommunications is OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – multiple accesses with orthogonal frequency division multiplexing) which allows to effectively combat multipath. The article proposes not to fight with multipath but to use all rays when receiving a signal. To do this it is necessary to evaluate the impulse response of the channel along the training sequence, and then when receiving the signal compare it with the response samples formed in the receiver for the whole input pulse train. The decision is made in favor of the sample, which has the greatest correlation with the input sequence.

Keywords: Wi-Fi; WiMax; LTE; McWILL; OFDM.

В современной радиосвязи основным методом мультиплексирования сигнала является OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – множественный доступ с ортогональным частотным разделением каналов). Этот метод используется в Wi-Fi, WiMax, LTE, McWILL, в цифровом телевизионном вещании DVB и в звуковом вещании DRM. Это связано с тем, что современные системы характеризуются высокоскоростной передачей данных. При этом основной проблемой является межсимвольная интерференция, возникающая при многолучевом распространении сигналов. Объясним это на таком примере: пусть мы хотим обеспечить скорость передачи по радиоканалу $V=100$ Мбит/с. Если при передаче используется одна несущая, то длительность импульсов равна $T_u = 10^{-8}$ с.

Если время задержки прихода второго луча (или последующих лучей) примерно равно длительности импульса, то эти сигналы накладываются на следующий импульс первого (прямого) луча. В этом случае возникают ошибки, и если их много, то избыточное кодирование не сможет помочь. Посчитаем разность хода лучей при времени задержки, равной T_u .

$$S = C * T_u = 3108 \text{ м/с} * 10^{-8} \text{ с} = 3 \text{ м.}$$

где:

$$C = 3 * 10^8 \text{ м/с} - \text{ скорость распространения сигнала по радиоканалу.}$$

Понятно, что такая разность в ходе сигнала возникает практически всюду. Чтобы избавиться от межсимвольной интерференции, необходимо увеличить длительность сигнала в сотни, а то и в тысячи раз. Тогда интерференция будет заметна при разностях хода в 300 метров и в 3000 метров соответственно. Но при такой разнице в ходе сигнала, второй луч будет иметь намного меньшую мешающую мощность. Таким образом, увеличение длительности символа значительно снижает межсимвольную интерференцию переотраженных сигналов, что обеспечивает приём сигнала даже в отсутствии прямой видимости между мобильной и базовой станциями. Так как увеличение длительности импульса приводит к соответствующему уменьшению скорости передачи сигнала, что неприемлемо, то возникла идея в расщеплении (распараллеливании) передаваемого сигнала на N отдельных низкоскоростных потоков с большой длительностью передаваемых символов.

В методе мультиплексирования OFDM входящий поток данных делится на несколько параллельных подпотоков с более низкой скоростью передачи (что приводит к увеличению длительности символа), а каждый подпоток модулируется и передается на своей ортогональной поднесущей. Подпотoki представляют собой данные от одного или нескольких абонентов.

Ортогональность поднесущих позволяет на приёме выделить каждую поднесущую из суммарного сигнала даже в случае частичного перекрытия полос их спектров. Условием ортогональности поднесущих является равенство:

$$\Delta f = f_i - f_{i-1} = T / Tu \quad (1)$$

То есть, время длительности передаваемого сигнала Tu должно укладываться целое число периодов разностной частоты Δf .

Для повышения устойчивости сигнала к разбросу задержки в каждой поднесущей вводится защитный интервал Tg (за счёт уменьшения длительности символа OFDM) (рис. 1).

На рис. 1 не изображены «хвосты» от лучей предыдущего символа, которые попадают в защитный интервал. Показан выбор величины защитного интервала.

Существует много различных разновидностей метода OFDM. Они отличаются количеством поднесущих, методами модуляции каждой из несущих и длительностями защитных интервалов. В этом методе входящий цифровой поток разбивается на блоки по N символов (N – число поднесущих). Каждый блок последовательных данных распараллеливается, изменяется с учётом применяемого вида модуляции и с помощью обратного преобразования Фурье объединяется в сумму ортогональных поднесущих. Полученный OFDM сигнал в цифро-аналоговом преобразователе (ЦАП) преобразуется в высокочастотный радиосигнал, который передаётся по радиоканалу [1].

В приёмнике (правая часть на рис. 2) сначала осуществляется преобразование аналогового сигнала в цифровой, затем полученная последовательность с помощью быстрого преобразования Фурье (такое преобразование является обратным к обратному быстрому преобразованию Фурье) преобразуется в параллельные потоки данных. И, окончательно, из параллельных потоков образуется последовательный поток переданных данных. На рис. 2 показаны функциональная схема OFDM с использованием обратного и прямого преобразований Фурье.

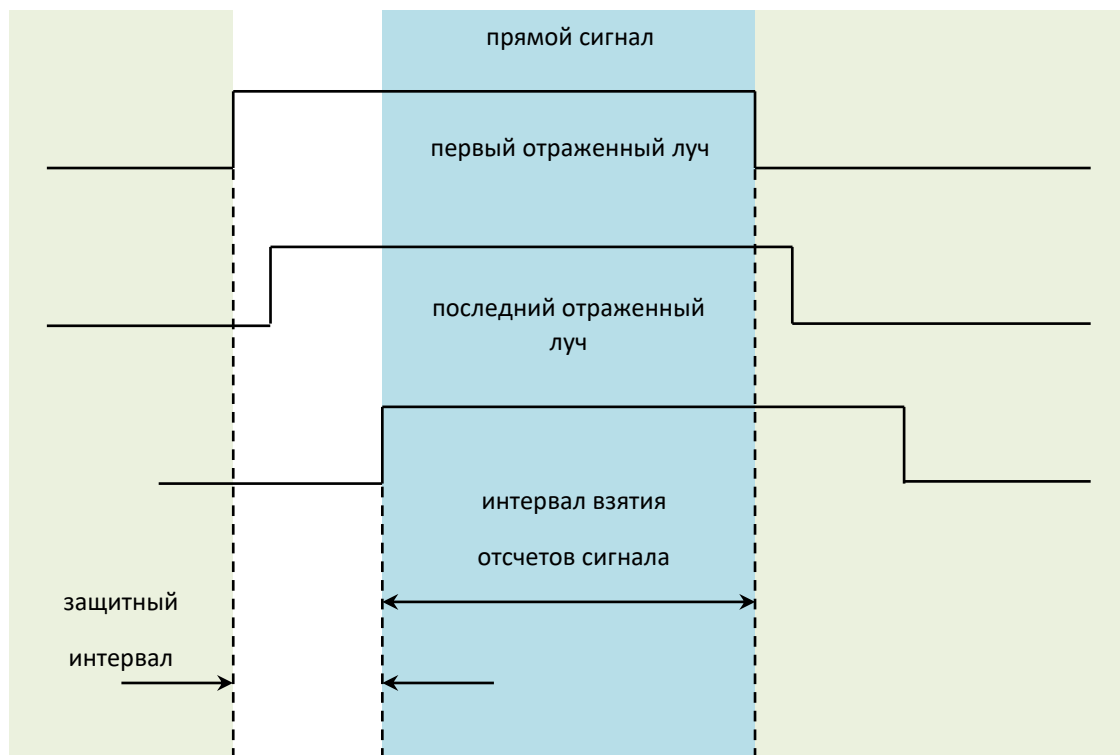


Рисунок 1

В [2] рассматриваются алгоритмы оптимального приёма сигнала при многолучевом распространении с использованием обучающей последовательности, которые позволяют существенно сократить число защитных интервалов. К сожалению, непосредственно применить изложенный там способ к сигналу OFDM нельзя. Это связано с тем, что алгоритмы, предложенные в [2] используют обучающую последовательность, периодически передаваемую между информационными и управляющими сигналами. В LTE, например, передают пилот сигналы, а не последовательность сигналов. Таким образом, для оценки импульсного отклика канала по алгоритмам [3] нужно в сигнал OFDM вставлять специальную обучающую последовательность.

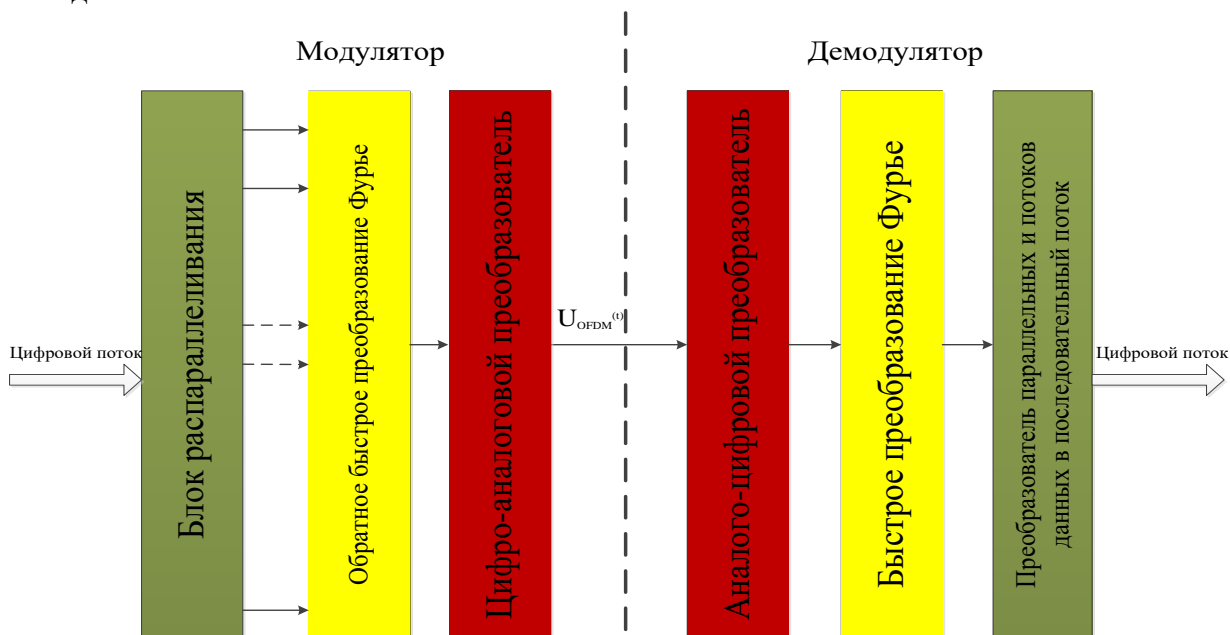


Рисунок 2

Предлагается следующий алгоритм работы приемника OFDM сигнала (рис. 3). Блок-схема приёмника OFDM сигнала:

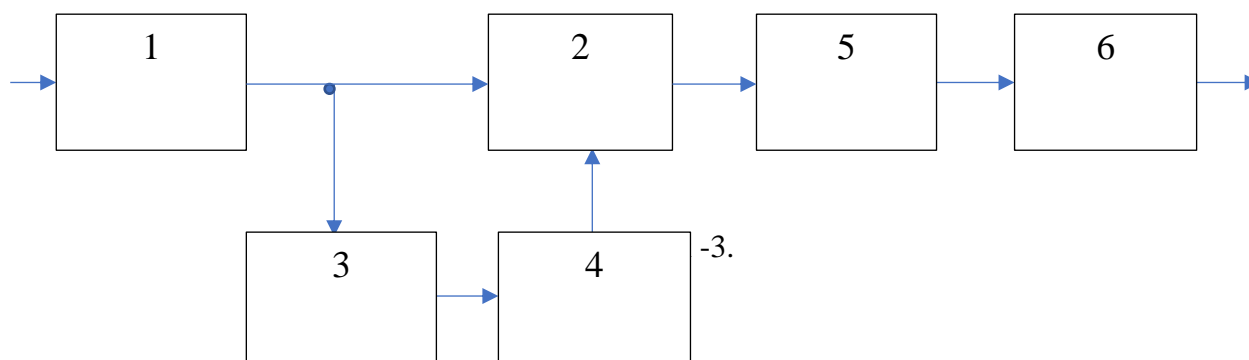


Рисунок 3

Аналоговый OFDM сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя 1, осуществляющего преобразование входного аналогового сигнала OFDM в последовательность из M цифровых информационных сигналов, где M – целое число. При этом в OFDM сигнале периодически передается заранее определенная обучающая последовательность. Количество элементов обучающей последовательности и периодичность их передачи определяются параметрами OFDM сигнала. Величина M зависит только от быстродействия процессора – возможности в режиме он-лайн произвести формирование 2^M образцов импульсного отклика канала на все возможные значения последовательности из M информационных цифровых сигналов и сравнить их с откликом на последовательность из M информационных цифровых сигналов, полученном из эфира. Такое число образцов – 2^M – получается, если перебрать все возможные значения последовательности из M двоичных символов. Полученная цифровая последовательность поступает на вход блока 3 формирования импульсного отклика канала, если входная последовательность является откликом на обучающую последовательность, вставленную в сигнал OFDM, или на вход блока 2 сравнения, если входная последовательность является откликом на информационную последовательность сигнала OFDM, полученную после преобразования из эфира. В блоке 3 формирования импульсного отклика канала по заранее известной обучающей последовательности и принятому из эфира отклику на эту обучающую последовательность определяется импульсный отклик канала. Импульсный отклик – это реакция канала на единичный одиночный импульс. Блок 3 формирования импульсного отклика может быть реализован и работает по алгоритму, изложенному в [3].

После этого в блоке 4 формирования образцов осуществляется формирование 2^M образцов импульсного отклика канала на все возможные значения последовательности из M информационных сигналов OFDM, которые поступают на второй вход блока 2 сравнения. Алгоритм сравнения состоит из двух этапов. На первом этапе, используя алгоритм Витерби, отбрасываются все комбинации, которые являются невозможными (маловероятными) для данной входной последовательности. Таким образом существенно сокращается число возможных образцов импульсного отклика канала на последовательность из M информационных сигналов OFDM, которые используются для сравнения. На втором этапе в блоке 2 сравнения производится сравнение образцов, оставшихся после реализации алгоритма Витерби, с откликом на полученную на выходе аналого-цифрового преобразователя 1 последовательность из M информационных сигналов OFDM, полученных из эфира.

Количество информационных сигналов M , которые одновременно обрабатываются в блоке 4 формирования образцов и в блоке 2 сравнения, определяется только быстродействием работы этих блоков, которые могут быть выполнены с помощью средств компьютерной

техники аналогично [1]. Так как приёмное устройство осуществляет обработку последовательности из M информационных сигналов OFDM, то после каждого M информационных сигналов в передатчике необходимо вставлять защитный интервал. Отметим, что в стандартном OFDM сигнале защитный интервал вставляется после каждого информационного сигнала.

Далее блок 2 сравнения выбирает ту последовательность из M информационных сигналов, импульсный отклик которой меньше всего отличается от отклика на информационную последовательность, принятую из эфира.

Затем выбранная в блоке 2 сравнения цифровая последовательность поступает на вход блока 5 быстрого преобразования Фурье, и производится быстрое обратное преобразование Фурье, полученной из блока 2 сравнения последовательности в параллельный поток данных и возвращение обработки сигнала из частотной области во временную.

С выхода блока 5 быстрого преобразования Фурье преобразованная цифровая последовательность поступает на вход блока 6 преобразователя параллельных потоков в последовательный поток, осуществляющего преобразование N параллельных потоков в последовательный поток, где N – число ортогональных поднесущих сигнала OFDM.

В стандартный сигнал OFDM вставляются защитные интервалы [1], которые позволяют избавиться от «мешающего» воздействия второго и последующих лучей. То есть, в стандартном методе OFDM «борются» с многолучевостью, вместо того, чтобы её использовать. За счет оценивания импульсного отклика канала в предложенном способе используется энергетика всех лучей, а не только первого.

Таким образом, благодаря тому, что защитный интервал вставляется не после каждого информационного символа, а только через каждые M информационных символов, можно значительно повысить скорость передачи OFDM сигналов.

Литература

1. Лохвицкий М.С., Мардер Н.С. Сотовая связь: от поколения к поколению. – М.: Издательство ИКАР, 2014. – С. 193-194.
2. Лохвицкий М.С. Алгоритмы оптимального приёма сигнала и обучающие последовательности в сотовой связи // в сборнике: труды XXXV конференции «Мобильный бизнес»: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом. – М.: ЗАО «НИРИТ». – С. 16-25.
3. Авторское свидетельство СССР № 1425852 Н 04 В 3/04, Н 04 В 15/00 19.03.1987 г.
4. Аджемов А.С., Хромой Б.П., Лохвицкий М.С. Обеспечение единства измерений времени соединения и объема информации в системах мобильной связи // Экономика и качество систем связи, 2016. – № 1. – С. 18-23.
5. Аджемов А.С., Хромой Б.П., Лохвицкий М.С. Обеспечение единства измерений времени соединения и объема информации в системах мобильной связи // в сборнике: «Мобильный бизнес»: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом. Сборнике материалов XXXVI Международной конференции РАЕН. – М.: ЗАО «НИРИТ». 2015. – С. 15-17.
6. Лохвицкий М.С. Алгоритм оптимального приёма сигнала и обучающие последовательности в сотовой связи // в сборнике: «Мобильный бизнес»: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом. Сборнике материалов XXXV Международной конференции РАЕН. – М.: ЗАО «НИРИТ». 2014. – С. 16-25.
7. Аджемов А.С., Хромой Б.П., Лохвицкий М.С. Метрологическое обеспечение перспективных мобильных сетей // в сборнике: «Мобильный бизнес»: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом. Сборнике материалов XXXV Международной конференции РАЕН. – М.: ЗАО «НИРИТ». 2014. – С. 26-36.