

УДК 621.396.41

Н.А. Лобанов, Д.А. Долгих, Е.П. Ворошилин

## Адаптивный эквалайзер для системы связи WiMAX

Предложена схема эквалайзера для системы связи WiMAX с компенсацией смещения несущей частоты. Схема построена на основе адаптивного фильтра с корректировкой его весовых коэффициентов по методу наименьших квадратов. Показана эффективность предложенного эквалайзера в условиях многолучевого распространения.

**Ключевые слова:** адаптивный эквалайзер, WiMAX, смещение несущей частоты.

**Задача эквалайзирования.** На сегодняшний момент мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, обозначаемое аббревиатурой OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), широко применяется в беспроводных системах связи [1]. OFDM – это схема частотного уплотнения, используемая как метод цифровой модуляции с несколькими поднесущими. Структура OFDM-символа, используемого в системе связи WiMAX, определяемого стандартом [2], представлена на рис. 1.

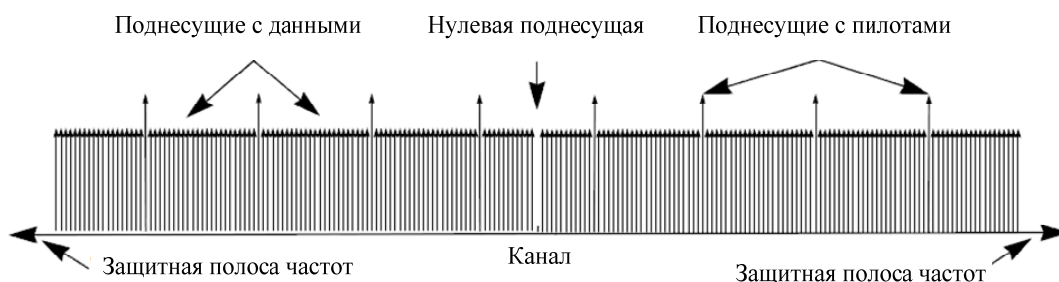


Рис. 1. Структура OFDM-символа

Как и любой другой сигнал, OFDM-сигнал при прохождении через канал подвергается искажениям. В дискретной форме мы можем записать отношение между переданным сигналом  $x[i]$  и принятым сигналом  $y[i]$ , прошедшим через многолучевой канал с частотно-селективными замираниями, следующим образом [3]:

$$y[i] = \sum_{d=1}^D h[d]x[i-(d-1)] + n[i], \quad (1)$$

где  $d = \{1, \dots, D\}$  – задержка для каждого луча распространения;  $n[i]$  – аддитивный гауссовский шум;  $h[d]$  – импульсная характеристика многолучевого канала, определяемая по формуле (2):

$$h[d] = \int h(t)\delta[t-(d-1)T]dt, \quad (2)$$

где  $\delta(t)$  – дельта-функция,  $T = 1/2W$ , где  $W$  – полоса сигнала.

Кроме воздействия канала, искажения сигнала могут возникнуть из-за разницы частот гетеродинов в приемнике и передатчике, что приводит к повороту принимаемых точек созвездия (т.е. возникает фазовая ошибка). В таком случае выражение (1) запишется следующим образом:

$$y[i] = e^{-j2\pi\varepsilon i} \sum_{d=1}^D h[d]x[i-(d-1)] + n[i], \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – относительный уход частоты гетеродинов приемника и передатчика, определяемый по формуле (4):

$$\varepsilon = \Delta f / 1/NT, \quad (4)$$

где  $\Delta f$  – разница частот гетеродинов приемника и передатчика;  $N$  – количество поднесущих одного символа длительностью  $T$ . От символа к символу разница частот гетеродинов будет

увеличиваться и, следовательно, фазовая ошибка тоже возрастает. На рис. 2 приведен пример фазовой ошибки, вызванной разницей частот гетеродинов.

Для уменьшения амплитудных, частотных и фазовых искажений переданного сигнала применяют эквалайзирование канала. Существуют различные методы и техники эквалайзирования [4]: обращаящий в ноль (zero forcing – ZF) эквалайзер, эквалайзер по методу минимальной среднеквадратичной ошибки, по методу максимального правдоподобия, с решающей обратной связью. Общий принцип данных эквалайзеров состоит в делении поднесущих принятого сигнала на оцененную передаточную функцию канала. Для оценки канала передают известную тренировочную последовательность, а также используют пилотные поднесущие.



Рис. 2. Поворот точек созвездия QAM-4

**Адаптивный эквалайзер.** Параметры реальных каналов распространения изменяются во времени, поэтому требуется их периодическая оценка, скорость которой связана со скоростью изменения канала. При большой скорости изменения канала необходимо увеличивать число пилотов или частоту передачи тренировочной последовательности, что в свою очередь приводит к уменьшению скорости передачи полезной информации. Альтернативным вариантом является эквалайзер на основе адаптивного фильтра [5, 6]. В системах, использующих адаптивный фильтр, после передачи тренировочной последовательности эквалайзер начинает «следить» за изменением канала путем умножения принятого сигнала на подстраиваемые коэффициенты фильтра. Таким образом, требуется менее частая передача тренировочной последовательности, что, в свою очередь, не приводит к потере скорости передачи полезной информации.

Адаптивную фильтрацию целесообразно проводить в частотной области [7]. Одним из вариантов адаптивного фильтра с обработкой сигнала в частотной области является фильтр, показанный на рис. 3.

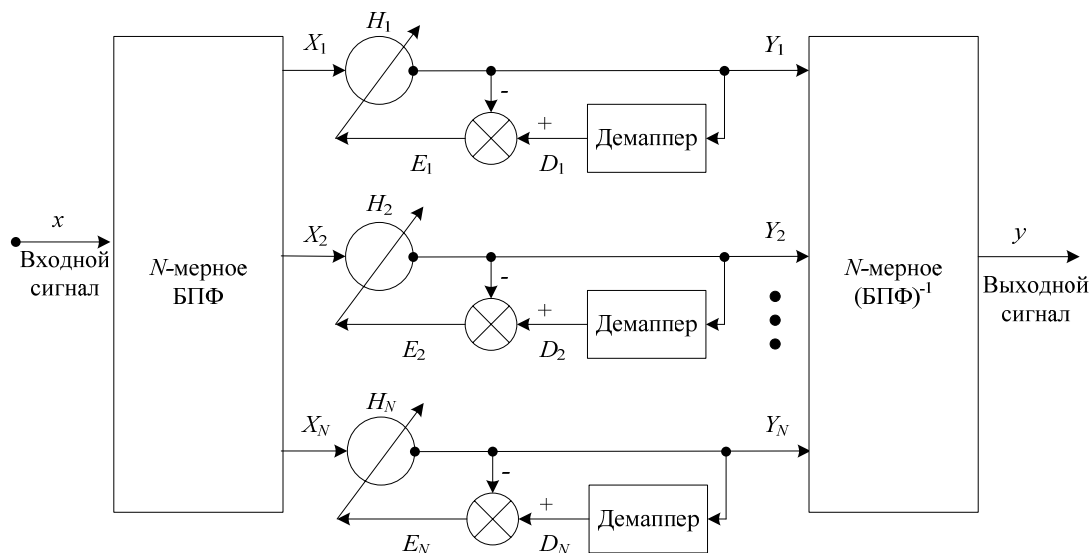


Рис. 3. Адаптивный фильтр с обработкой сигнала в частотной области

Отсчеты входного сигнала  $x(k)$  поступают на блок  $N$ -мерного БПФ. Сигнал на выходе блока БПФ представляет собой один OFDM-символ, состоящий из  $N$  поднесущих. Далее, полученные поднесущие поступают на вход адаптивного фильтра. Фильтр имеет  $N$  комплексных весов  $H$ , каждый из которых соответствует каждой поднесущей. Взвешенные выходные сигналы  $Y$  поступа-

ют на блок демалпера\* для формирования  $N$  комплексных искомым откликов  $D$ . Значения взвешенных выходных сигналов  $Y$  вычитаются из полученных искомым откликов  $D$  для получения  $N$  комплексных сигналов ошибок  $E$ . Для каждого OFDM-символа производится однократная независимая корректировка каждого весового коэффициента.

Для корректировки каждого весового коэффициента используется комплексный МНК-алгоритм [7]. Для  $i$ -й поднесущей  $k$ -й комплексный весовой коэффициент корректируется в соответствии с уравнением

$$H_i(k+1) = H_i(k) + \mu E_i X_i^*(k), \quad (5)$$

где  $\mu$  – константа, определяющая скорость сходимости и устойчивость адаптивного процесса, (\*) – обозначает знак комплексного сопряжения. В выражении (5) ошибка  $E_i(k)$  определяется в соответствии с выражением (6), а выходной сигнал в частотной области  $Y_i(k)$  – в соответствии с выражением (7):

$$E_i(k) = D_i(k) - Y_i(k), \quad (6)$$

$$Y_i(k) = X_i(k) H_i(k). \quad (7)$$

#### Адаптивный эквалайзер с компенсацией смещения опорных частот гетеродинов

В соответствии со стандартом [2] перед каждым пакетом данных, состоящих из  $k$  – символов, передается тренировочная последовательность REF2, по которой можно вычислить начальные комплексные коэффициенты фильтра  $H_i(0)$ . С помощью тренировочной последовательности так же происходит синхронизация опорных гетеродинов приемника и передатчика. Но т.к. подстройка частот гетеродинов происходит с ошибкой и следующая тренировочная последовательность поступит только через  $k$  символов, то в системе появляется смещение несущей частоты  $\Delta f$ . Если смещение частоты небольшое, то полученная фазовая ошибка может быть скомпенсирована с помощью эквалайзера, представленного выше. Но если уход несущей частоты увеличивается, то адаптивная система перестает успевать за изменением фазы, и следует увеличивать  $\mu$ . Увеличение же константы  $\mu$ , определяющей скорость сходимости, приводит к внесению дополнительных шумов к принятому сигналу и потере устойчивости адаптивного процесса. Следовательно, необходимо разделить процесс компенсации фазовой ошибки за счет воздействия канала и ухода несущей частоты.

На рис. 4 представлена предлагаемая схема эквалайзера с компенсацией смещения несущей частоты.

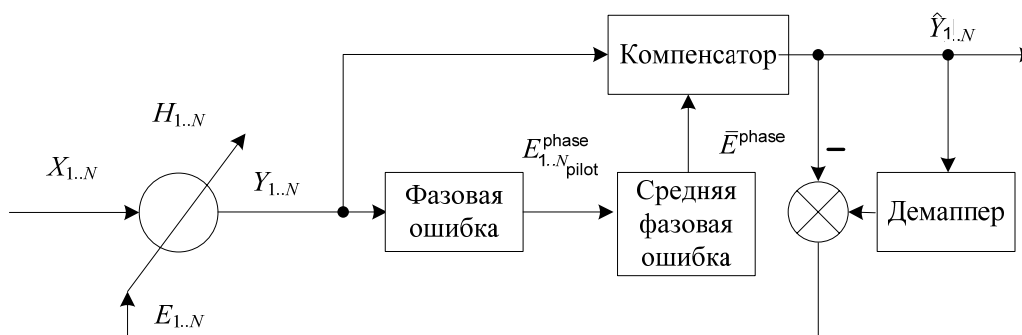


Рис. 4. Схема эквалайзера с компенсацией смещения несущей частоты

Рассмотрим работу предложенной схемы. Взвешенные коэффициенты  $Y_i$  поступают на блок измерения фазовой ошибки, где она определяется по известным сигналам – пилотам. Далее определяется средняя фазовая ошибка, пропорциональная углу, на который необходимо повернуть принятые точки созвездия. В блоке компенсатора происходит поворот всех комплексных чисел на каждой поднесущей на полученный угол. Далее эквалайзирование происходит по схеме, представленной на рис. 3.

\* Демалпер – блок, определяющий ближайшую точку созвездия.

**Результаты моделирования.** В ходе моделирования было проведено сравнение предложенной схемы эквалайзера с ZF и адаптивным фильтром. Для этого была получена битовая вероятность ошибки (BER) при различных отношениях сигнал / шум (С/Ш) в условиях многолучевого распространения. Результаты моделирования приведены на рис. 5.

Также была получена зависимость BER от относительного ухода частоты гетеродинов приемника и передатчика для адаптивного эквалайзера с компенсацией смещения несущей частоты. Зависимость представлена на рис. 6.

При моделировании передаваемый сигнал проходил через многолучевой канал с частотно-селективными замираниями. Также к сигналу были добавлены аддитивный белый гауссовский шум и фазовая ошибка, имитирующая уход несущей частоты гетеродинов, относительная величина которого составляла  $\epsilon = 0,01$ .

В качестве передаваемого сигнала использовалась последовательность из 100 OFDM-символов. Структура каждого символа приведена в стандарте [2] и описана в табл. 1. Каждая поднесущая модулирована QAM-4. Перед пакетом из 100 символов передается тренировочная последовательность REF2 [2]. Полоса частот, занимаемая сигналом, составляла 10 МГц.

В качестве канала был выбран многолучевой канал с частотно-селективными замираниями pedestrian-A (PA) [8]. Характеристики канала приведены в табл. 2. Для набора статистики количество реализаций канала для каждого значения С/Ш составляла 1000 раз.

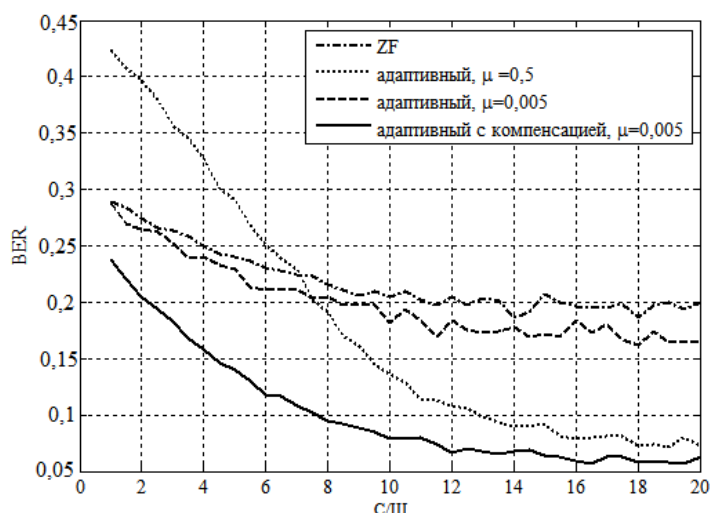


Рис. 5. Зависимость BER от отношения С/Ш для различных эквалайзеров

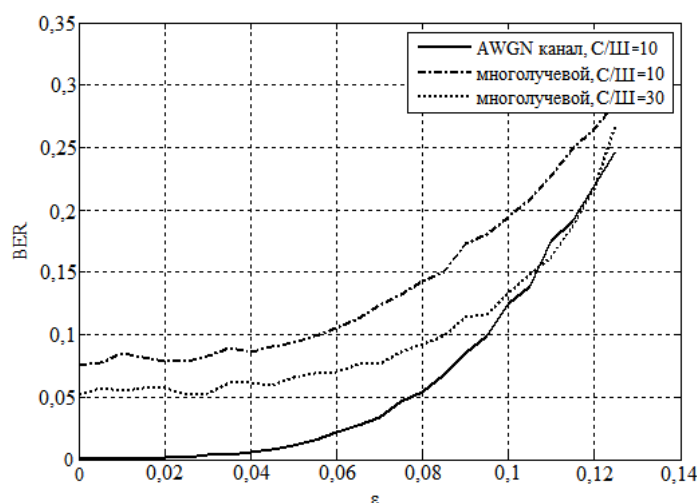


Рис. 6. Зависимость BER от относительного смещения несущей частоты для предложенного эквалайзера

Описание OFDM-символа

Описание поднесущих	Количество, шт	Номер поднесущей
Общее количество	256	0...255
Нулевые поднесущие	56	0...27, 128, 228...255
Пилотные поднесущие	8	40, 65, 90, 115, 141, 166, 191, 216

Таблица 1

Характеристики канала распространения

Название канала	Затухание сигнала в лучах распространения, дБ	Задержка в каждом луче, мкс	Частота Доплера, Гц
РА	[0; -9,7; -19,2; -22,8]	[0; 0,110; 0,190; 0,410]	100

Таблица 2

**Заключение.** Данные, полученные в ходе моделирования, показали, что схема предложенного адаптивного эквалайзера справляется не только с искажениями сигнала, вызванными каналом, но и

позволяет лучше компенсировать смещение несущей частоты, вызванное разницей частот гетеродинов приемника и передатчика, по сравнению с обычным адаптивным фильтром или эквалайзером по методу zero forcing.

Как и предполагалось, адаптивный фильтр с маленьким коэффициентом сходимости  $\mu$  учитывает изменение канала, но не успевает за изменением фазы сигнала. Напротив, фильтр с большим  $\mu$  учитывает не только изменение канала, но и фазовую ошибку, обусловленную уходом несущей частоты. Однако происходит внесение дополнительных шумов в систему, что сказывается при малых отношениях С/Ш.

В данных условиях эквалайзер по методу zero forcing является худшим, т.к. оценка передаточной функции канала производится только по тренировочной последовательности.

Дальнейшие исследования в данной области предполагают выбор оптимального метода нахождения коэффициента сходимости  $\mu$ .

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07.09.2010 в порядке реализации Постановления №218 Правительства РФ.

#### *Литература*

1. Li Y. Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications / Y. Li, G. Stuber. – NY: Springer, 2006. – 308 p.
2. IEEE Std. 802.16 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html>, свободный (дата обращения: 10.03.2011).
3. Haykin I. Multiple-input multiple-output channel models: theory and practice / I. Haykin, S. Simon. – NJ.: Wiley & Sons, 2010. – 225 p.
4. Goldsmith A. Wireless communication. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 561 p.
5. Haykin S. Adaptive Filter Theory. – Third edition. – NJ: Prentice Hall, 1996. – 989 p.
6. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С. Стирнз. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
7. Адаптивные фильтры: пер. с англ. / П.М. Грант, К.Ф.Н. Коуэн, Б. Фридлендер, Д.Р. Трейчлер; под ред. П.М. Гранта, К.Ф.Н. Коуэна. – М.: Мир, 1988 – 392 с.
8. 3GPP TS 36.211. Physical Channels and Modulation. Technical Specification Group Radio Access Network (Release 8) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.quintillion.co.jp/3GPP/Specs/36201-800.pdf>, свободный (дата обращения: 15.04.2011).

---

#### **Лобанов Николай Александрович**

Аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа  
Эл. почта: LobanovNA@sibmail.com  
Тел.: +7-923-409-13-30

#### **Долгих Дмитрий Анатольевич**

Доцент каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа  
Эл. почта: doda@micran.ru

#### **Ворошилин Евгений Павлович**

Зав. каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа  
Эл. почта: vep@tor.tusur.ru

Lobanov N.A., Dolgih D.A., Voroshilin E.P.

#### **Adaptive equalizer for communication system WiMAX**

Adaptive equalizer with compensating of carrier frequency shift for communication system WiMAX is suggested in the paper. The circuit is constructed on the basis of the adaptive filter with adjustment of its weight factors on a method of the least squares. Efficiency of the offered equalizer in the conditions of multipath propagation is shown.

**Keywords:** adaptive equalizer, WiMAX, carrier frequency shift.