

УДК 621.396.41

В.В. Ковалев, Д.А. Покаместов

## Способы улучшения эквалайзирования в системах связи с OFDM

Рассматриваются способы улучшения эквалайзирования при передаче сигналов в каналах с шумом и многолучевым распространением для систем связи с OFDM. Метод доступа OFDM получил широкое распространение в сетях связи четвертого поколения. По сравнению с предыдущими технологиями он имеет ряд преимуществ: устойчивость к многолучевому распространению, высокая спектральная эффективность и др. Методы доступа, рекомендованные к использованию в сетях связи пятого поколения (5G), также основаны на OFDM. В работе решается задача нахождения эффективного способа расположения пилот-сигналов для улучшения оценки параметров канала и повышения качества приёма информации. Приведены результаты исследований влияния способа расположения пилотных поднесущих на вероятность битовой ошибки при передаче сигналов в многолучевых каналах. В качестве основы исследования используется модель приемопередающего комплекса OFDM сигналов, реализованная в програм-шум получены методом имитационного моделирования. Результаты могут быть использованы при разработке перспективных систем связи, в том числе систем беспроводной связи пятого поколения.

**Ключевые слова:** OFDM, эквалайзирование, многолучевое распространение, Matlab, пилот-сигнал.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-1-32-36

Системы цифровой связи в современном мире получают все большее распространение. Скорость, качество и защищённость передачи являются наиболее важными характеристиками таких систем. Качественный приём и обработка сообщений в условиях помех представляют большой интерес для исследователей, так как нынешние вычислительные мощности позволяют реализовать сложные методы и алгоритмы для решения этой задачи.

При распространении сигнала по каналу связи в результате воздействия шума, переотражения от различных объектов на пути распространения волны и других эффектов неизбежно возникают помехи. Спектр принятого сигнала может сильно искажаться, что влечёт за собой появление ошибок в принятом сообщении. По этой причине восстановление спектра является одной из важных задач приёмного устройства. В системах связи четвёртого поколения (WiMAX, LTE), использующих метод ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM), это реализуется следующим образом. В спектр каждого символа OFDM добавляются специальные опорные поднесущие, так называемые пилот-сигналы. Приемник, зная расположение пилотных поднесущих, может оценить искажения, вносимые каналом. По принятым значениям пилотных поднесущих, определяется передаточная функция канала, зная которую, восстанавливается спектр отправленного сигнала (эта процедура называется эквалайзированием).

С одной стороны, для повышения достоверности оценки передаточной функции канала можно добавить большее количество пилотных поднесущих: тогда спектр сигнала будет восстановлен лучше и ошибок соответственно будет меньше. Но так как число поднесущих в спектре символа OFDM ограничено, количество доступных пользователям частотных ресурсов снизится. Поэтому следует искать компромисс в зависимости от условий канала передачи и количества передаваемой информации.

Вышел ряд работ, посвященных некоторым аспектам техники эквалайзирования [4–6] и др. Например, в [4] рассматриваются вопросы выбора метода интерполяции в зависимости от состояния канала передачи.

Однако практически не рассматривается влияние способа расстановки пилот-сигналов внутри спектра передаваемого сигнала. Этому вопросу посвящена данная статья. Получены зависимости вероятностей битовых ошибок от отношения мощности сигнала к мощности шума на входе приемника для трех видов цифровой модуляции (BPSK, QPSK, QAM-16) при расстановке пилот-сигналов тремя способами.

### Эквалайзирование и способы размещения пилот-сигналов

Классический подход к эквалайзированию OFDM-сигналов иллюстрирует рис. 1 [1–3].

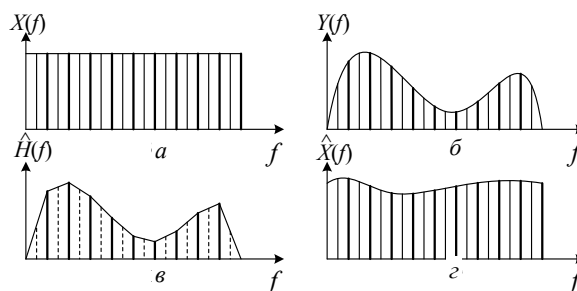


Рис. 1. Иллюстрация методики эквалайзирования: а – спектр передаваемого сигнала; б – спектр полученного сигнала; в – оценка АЧХ канала по значениям пилот-сигналов (для примера приведена линейная интерполяция); з – восстановленный спектр переданного сигнала

Спектр передаваемого символа рис. 1, а при прохождении через многолучевой канал искажается рис. 1, б. Зная позиции пилот-символов, приемник может оценить коэффициенты передачи соответствующих поднесущих. Используя интерполяцию, можно оценить амплитудно-частотную характери-

стику (АЧХ) канала для всех поднесущих [10]. Для улучшения качества эквалайзирования важно наличие пилотных поднесущих в начале и в конце спектра.

При выборе метода интерполяции было принято решение о применении метода интерполяции кубическими сплайнами, так как использование этого метода позволяет уменьшить количество ошибок при обработке сигналов с OFDM по сравнению с другими методами интерполяции [4, 6].

В настоящей работе представлены следующие способы размещения пилот-сигналов. Первый способ является классическим, два других предложены авторами статьи. Рассмотрим каждый из них.

1. Линейное расположение без накопления. В спектре каждого символа OFDM пилот-сигналы расположены равномерно с определённым шагом на одних позициях. Пример данной реализации представлен на рис. 2. Такое расположение пилотных поднесущих применяется в большинстве современных систем связи с OFDM.

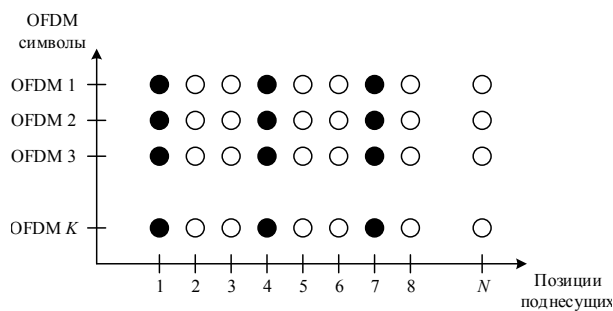


Рис. 2. Иллюстрация метода линейного расположения пилот-сигналов без накопления (чёрным отмечены пилотные поднесущие)

2. Линейное расположение с накоплением. Пилот-сигналы, как и в предыдущем случае, располагаются в спектре с определённым шагом, но их позиции меняются от символа к символу. Пример такой расстановки показан на рис. 3.

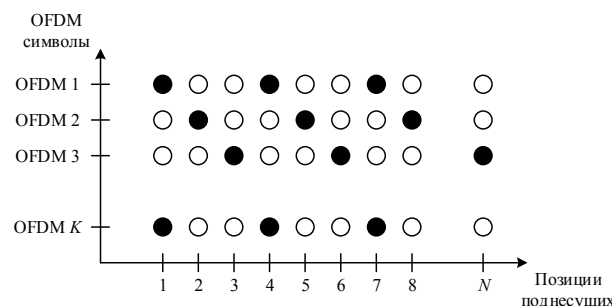


Рис. 3. Иллюстрация метода линейного расположения пилот-сигналов с накоплением (чёрным отмечены пилотные поднесущие)

В канале передачи присутствуют такие помехи, как шум и многолучевое распространение, а также действует эффект Доплера в результате движения объекта (в данном случае рассматривается движение абонента на автомобиле с определённой скоростью) [7]. Также необходимо учитывать, что параметры

канала постоянно меняются, поэтому по истечении некоторого времени информация о нём может стать недостоверной и эквалайзирование будет работать хуже. Время когерентности характеризует скорость изменения свойств канала во временной области. Для оценки влияния, вносимого эффектом Доплера, его можно рассчитать следующим образом [8]:

$$T_{\text{ког}} = \sqrt{\frac{9}{16 \cdot \pi \cdot f_{\text{Дmax}}^2}}, \quad (1)$$

где  $f_{\text{Дmax}}$  — максимальное доплеровское смещение частоты, Гц. Для сигналов системы LTE время когерентности при перемещении автомобиля со скоростью 120 км/ч в соответствии с (1) составляет менее 2 мс [9].

С другой стороны, при движении абонента меняются также параметры многолучевого канала (количество лучей, время запаздывания). Однако решающий вклад вносит именно доплеровское смещение. Так, за рассчитанные 2 мс перемещение абонента, а соответственно изменение длины отраженных лучей составит менее 10 см. Математическое моделирование показывает, что это не приводит к существенному изменению АЧХ канала.

Зная время когерентности, можно оценить, сколько OFDM-символов передастся по каналу связи, прежде чем его параметры существенно изменятся, и использовать значения пилот-сигналов из каждого символа (накопить их) для улучшения оценки канала связи.

3. Псевдослучайное расположение с накоплением. В этом методе пилотные поднесущие располагаются в спектре псевдослучайным образом и также осуществляется накопление их значений (рис. 4).

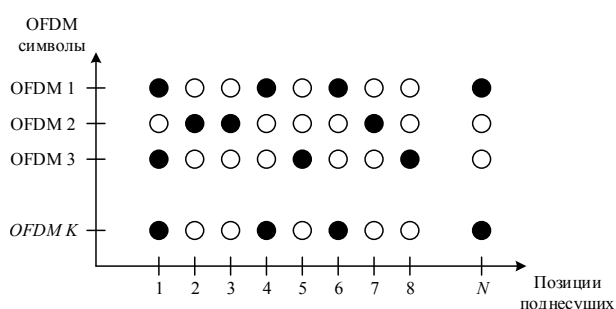


Рис. 4. Иллюстрация метода псевдослучайного расположения пилотных поднесущих с накоплением (чёрным отмечены пилотные поднесущие)

За счёт накопления информации спектр оценивается и восстанавливается более точно, кроме того, введение псевдослучайности позволяет передавать криптографически защищённые сообщения. Рассмотрим подробнее эти моменты.

В качестве псевдослучайных последовательностей (ПСП) можно использовать ансамбли М-последовательностей. Так как полоса OFDM-сигнала разбивается на 2048 поднесущих и пилотные сигналы могут занимать любую из них, генератор ПСП представляет собой 11-разрядный сдвиговый регистр. С помощью этого ключа можно сгенерировать

$2^{11} - 1 = 2047$  десятичных чисел. В настоящей работе рассматривались последовательности, которые задаются полиномом  $x^{11} + x^{10} + 1$ .

Криптозащищённость информации обеспечивается за счёт того, что пилотные поднесущие распределены в спектре по псевдослучайному закону. Поэтому третье лицо, которое не должно прочесть передаваемое сообщение, не сможет восстановить спектр сигнала, прошедшего через многолучевой канал (так как не будет знать алгоритм размещения пилотных поднесущих в спектре), и, следовательно, не сможет правильно расшифровать сообщение.

Для реализации такого подхода необходимо, чтобы устройство знало формируемую последовательность до начала приема. Это может быть достигнуто путем передачи информации о ПСП по специальным служебным каналам. Такие каналы существуют в функционирующих сетях LTE, WiMax и обладают высокой устойчивостью к взлому и перехвату информации [11].

Следует отметить, что такой метод может применяться для защиты информации только дополнительно вместе с известными эффективными подходами.

#### Результаты моделирования

В результате была создана математическая модель системы связи с OFDM-модуляцией, в которой реализованы три вышеперечисленных способа расстановки пилот-сигналов. В модели рассматривается многолучевой канал распространения радиоволн с доплеровским смещением и аддитивным белым гауссовским шумом.

Параметры математической модели:

- количество символов OFDM: 1000;
- количество поднесущих в каждом символе OFDM: 2048;
- количество пилот-сигналов: 16 (+2 по краям спектра);
- несущая частота: 2 ГГц;
- полоса сигнала: 10 МГц;
- тип канала многолучевого распространения: EVA (модель «автомобиля») [9];
- максимальный доплеровский сдвиг: 222,2 Гц (при скорости движения 120 км/ч).

На рис. 5 изображена возможная реализация АЧХ канала EVA.

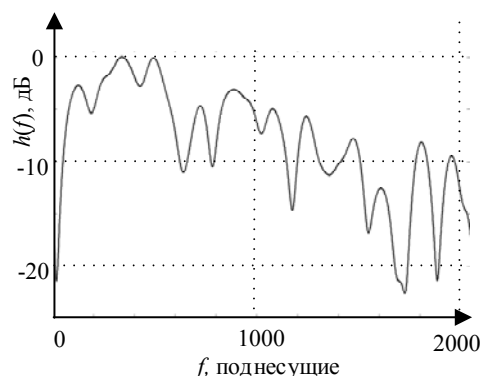


Рис. 5. Возможная реализация АЧХ канала EVA

Ниже на рис. 6–8 представлены полученные графики зависимостей вероятности битовой ошибки (bit error rate, BER) от отношения сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR) для каждого из способов при использовании трёх видов модуляции: BPSK, QPSK и QAM-16 [12].

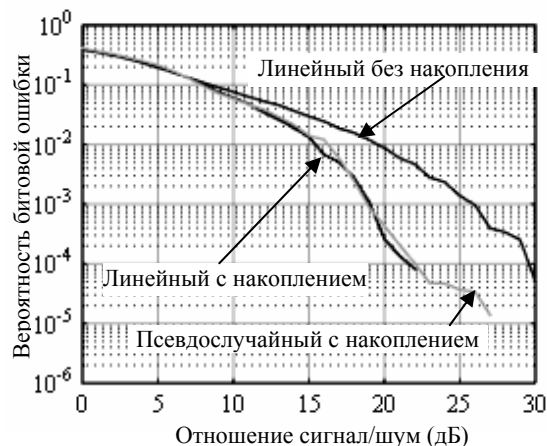


Рис. 6. График BER для модуляции BPSK

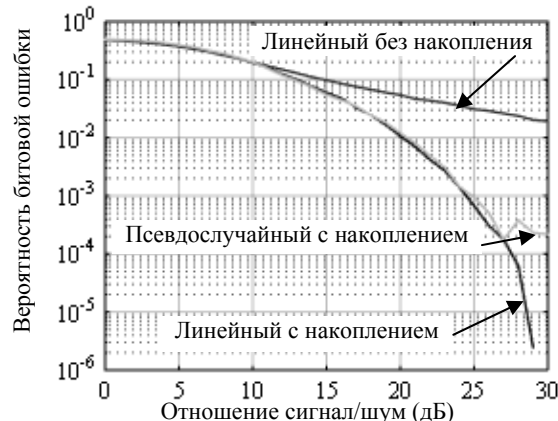


Рис. 7. График BER для модуляции QPSK

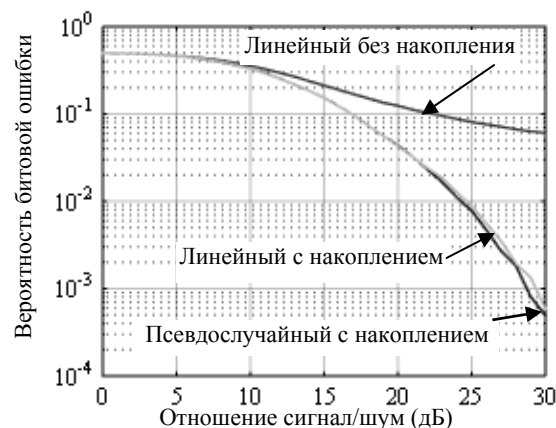


Рис. 8. BER для модуляции QAM-16

Из рис. 6–8 видно, что наилучшим методом расстановки пилот-сигналов является линейный метод расстановки с накоплением. Однако метод псевдослучайной расстановки лишь немного уступает ему, но при этом он криптографически стоек для расшифровки сообщения, что в итоге делает именно его использование наиболее приемлемым для пере-

дачи информации. Использование накопления значений пилотных сигналов позволяет улучшить качество принимаемого сигнала, сохраняя при этом скорость передачи данных и экономя частотный ресурс.

#### Выводы

Предложенные способы линейного и псевдослучайного расположения пилот-сигналов с накоплением позволяют производить достоверную оценку параметров многолучевого канала распространения радиоволн с белым гауссовским шумом и доплеровским смещением. При этом требуется существенно меньшее количество пилот-сигналов, чем при классическом линейном расположении. В результате этого увеличивается эффективность использования частотно-временного ресурса и соответственно скорость передачи данных.

Предложенные способы могут быть использованы при оценке параметров канала в системах связи следующего поколения. Кроме того, псевдослучайное расположение пилот-сигналов может быть использовано в системах специальной связи в качестве дополнительной меры повышения защищенности передаваемой информации.

#### Литература

1. Fazel K. Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX / K. Fazel, S. Kaiser. – 2nd ed. – Wiley, 2008. – 380 p.
2. Prasad R. OFDM for wireless communications systems / Ramjee Prasad. – London: Artech House, 2004. – 291 p.
3. Ковалев В.В. Формирование и обработка OFDM-сигналов / В.В. Ковалев, О.Ю. Селецкая, Д.А. Покаместов // Молодой ученый. – 2016. – № 14 (118). – С. 151–154.
4. Исследование методов эквалайзирования для систем связи с использованием OFDM-сигналов / Р.Р. Абеннов, А.С. Вершинин, Е.П. Ворошилин, Е.В. Рогожников // Вестник СибГУТИ. – 2013. – № 1 (21). – С. 50–56.
5. Джиган В.А. Адаптивные фильтры и их приложения в радиотехнике и связи // Современная электроника. – 2009. – № 9. – С. 56–63.
6. Ковалев В.В. Использование эквалайзирования для борьбы с многолучевым распространением / В.В. Ковалев, Д.А. Покаместов // Science time. – 2016. – №7. – С. 104–112.
7. Волков Л.Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учеб. пособие / Л.Н. Волков, М.С. Немировский, Ю.С. Шиныхов. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.
8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, поиск: пер. с англ.; под ред. А.В. Назаренко. – М.: Вильямс, 2003. – 1114 с.
9. 3GPP TS 136.104, version 9.4.0, Release 9, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Base station (BS) radio transmission and reception [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136100\\_136199/136104/09\\_04.00\\_60/ts\\_136104v90400p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136104/09_04.00_60/ts_136104v90400p.pdf), свободный (дата обращения: 12.02.2017).
10. Бутусов П.Н. Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 320 с.
11. Рашич А.В. Сети беспроводного доступа WiMAX: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2011. – 179 с.
12. ETSI EN 302 755 v1.4.1 (2015–07). Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and

modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302700\\_302799/302755/01.04.01\\_20/en\\_302755v010401a.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302700_302799/302755/01.04.01_20/en_302755v010401a.pdf), свободный (дата обращения: 12.02.2017).

---

#### Ковалев Василий Васильевич

Студент каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-913-802-77-14  
Эл. почта: vasya.kowalev@yandex.ru

#### Покаместов Дмитрий Алексеевич

Ассистент каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-952-809-43-75  
Эл. почта: dmaltomsk@mail.ru

Kovalev V.V., Pokamestov D.A.

#### Methods to improve equalization in connection systems with OFDM

This article discusses methods to improve equalization in multipath channel with noise for telecommunications systems with OFDM. The OFDM access method was used in fourth generation communication system. Compared with previous technologies, it has several advantages. The study solves a problem of finding the best way to position pilot-signals to improve the quality of the received information. As basis for application of these methods the receiver–transmitter complex of OFDM signals, implemented in MatLAB is used. The main results of the work consist in obtaining the dependencies of probabilities of bit errors on the signal-to-noise ratio by the simulation method. The results can be used in the development of advanced communication systems, including fifth-generation wireless communication systems.

**Keywords:** OFDM, equalization, multipath, MatLAB, pilot-signal.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-1-32-36

#### References

1. Fazel K., Kaiser S. *Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX*. 2nd ed. Wiley, 2008. 380 p.
2. Prasad R. *OFDM for wireless communications systems*. Artech House, 2004. 291 p.
3. Kovalev V.V., Seleckaya O.Yu., Pokamestov D.A. Formation and processing of OFDM signals. *Young scientist*, 2016, no 14(118), pp. 151–154 (in Russ.).
4. Abenov R.R., Vershinin A.S., Voroshilin E.P., Rogozhnikov E.V. Research of equalization methods for the communication systems using OFDM signals *Vestnik Sib-GUTI*, 2013, no 1 (21), pp. 50–56 (In Russ.).
5. Dzhigan V.A. Adaptive filters and their applications in radio engineering and communications. *Modern electronics*, 2009, no. 9, pp. 56–63 (In Russ.).

6. Kovalev V.V. Pokamestov D.A. The use of equalization for the control of multi-lobe propagation. *Science time*, 2016, no. 7, pp. 104–112 (In Russ.)

7. Volkov L.N., Nemirovskij M.S., Shinakov Yu.S. *Sistemy cifrovoj radiosvyazi: bazovye me-tody i harakteristiki* [Digital radio communication systems: basic methods and characteristics]. Moskva, EHko-Trendz publ., 2005, 392 p. (In Russ.)

8. Sklar B. *Digital communications*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001, vol. 2, 1106 p.

9. 3GPP TS 136.104, version 9.4.0, Release 9, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Base station (BS) radio transmission and reception*. Available at: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136100\\_136199/136104/09.04.00\\_60/ts\\_136104v090400p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136104/09.04.00_60/ts_136104v090400p.pdf) (accessed: 01 July 2014).

10. Butusov P.N. *Interpolyaciya. Metody i komp'yuternye tekhnologii ih realizacii* [Methods and computer technologies for their implementation]. St. Petersburg, BHV- Petersburg publ., 2004, 320 p. (in Russ.)

11. Rashich A. V. *Seti besprovodnogo dostupa WiMAX* [Wireless communication system Wi-MAX]. St. Petersburg, Izdatel'stvo Politekhnicheskogo univer-siteta publ., 2011, 179 p. (In Russ.)

12. ETSI EN 302 755 v1.4.1 (2015–07). *Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and*

*modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*. Available at: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302700\\_302799/302755/01.04.01\\_20/en\\_302755v010401a.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302700_302799/302755/01.04.01_20/en_302755v010401a.pdf) (accessed: 01 July 2014).

---

**Vasiliy V. Kovalev**

Student, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin Av., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-913-802-77-14  
Email: vasya.kowalev@yandex.ru

**Dmitriy A. Pokamestov**

Assistant lecturer, Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin Av., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-952-809-43-75  
Email: dmaltomsk@mail.ru