РАЗДЕЛ XVII. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Белоусова Е.В., Кусайкин Д.В.

Методы оценки канала связи для системы передачи данных по технологии OFDM

*Уральский Технический Институт Связи и Информатики (филиал) Сибирский
Государственный Университет Телекоммуникаций и Информатики
(Россия, Екатеринбург)*

doi: 10.18411/lj-03-2020-47

ids: lj-03-2020-47

Аннотация

На основе анализа зарубежных публикаций, в данной статье представлен краткий обзор методов оценки канала связи для систем передачи данных по технологии OFDM, приводится краткое описание исследований и полученные в ходе его экспериментальной части результаты.

Ключевые слова: мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, OFDM модуляция.

1. Введение

В последнее время разработано большое количество эффективных технологий в области телекоммуникаций. Они включают в себя и мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM). Как известно, в системах OFDM передаваемый поток данных делится на несколько низкоскоростных потоков, которые передаются на разных поднесущих.

Сегодня одним из важных требований к беспроводным телекоммуникационным системам является поддержание заданной скорости передачи с абонентами, которые движутся с высокой скоростью. Это означает, что системы мобильной связи должны эффективно функционировать в условиях быстрых (высокочастотных) замираний. Кроме того, в городских условиях имеет место эффект многолучевого распространения сигнала. Часто из-за недостаточного разделения по времени составляющих сигнала, пришедших к приемнику разными путями (компонентов принимаемого сигнала при многолучевом распространении), их трудно различить и компенсировать. Неправильная оценка количества компонентов принимаемого сигнала при многолучевом распространении приводит к увеличению количества ошибок.

Для когерентного обнаружения принятых символов в системах с OFDM модуляцией необходимо оценить и скорректировать амплитудно-частотные характеристики каналов. Одним из методов оценки канала OFDM является оценка с помощью тестовых сигналов. Тестовые символы назначаются пилотным поднесущим, которые мультиплексируются с поднесущими переносимыми данными, а полная оценка АЧХ канала строится с использованием методов интерполяции.

Для решения данной проблемы начали проводиться исследования, целью которых является нахождение лучшего метода оценки канала связи для систем с OFDM модуляцией. На основе анализа зарубежных публикаций, в данной статье представлен краткий обзор методов оценки канала связи для систем передачи данных по технологии OFDM: приводится краткое описание различных исследований по данной тематике и анализируются их результаты.

2 Исследование методов оценки канала связи для систем передачи данных по технологии OFDM

2.1 Анализ влияния ширины полосы когерентности на методы подавления эффекта растекания спектра для оценки канала OFDM

В декабре 2014 года авторами [1] было проведено исследование влияния полосы когерентности беспроводных каналов на методы подавления эффекта растекания спектра для способов оценки частотной характеристики канала в системе OFDM (системе мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов) на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

В большинстве OFDM-системах для создания защитных полос в частотной области слева и справа от полезных несущих пилотных сигналов используются так называемые виртуальные несущие. Такой подход, например, защищает от переходных помех между соседними OFDM-системами. Проблема состоит в том, что виртуальные несущие в символе OFDM вызывают потерю ортогональности полезных несущих при оценке канала на основе ДПФ, что обусловлено проблемой эффекта растекания спектра. Для решения этой проблемы в работах [11,12,13,14,15] предлагаются оптимальные и квазиоптимальные методы. Однако результаты анализа показали, что производительность методов, базирующихся на ДПФ, сильно зависит от когерентности полосы пропускания каналов беспроводной связи. Если некоторые из участков оценочной частотной характеристики канала расположены вне полосы пропускания когерентности, тогда возникает ошибка оценки канала, вся производительность системы ухудшается, даже несмотря на высокое отношение сигнал / шум.

Виртуальные несущие в частотной области представляют собой прямоугольное окно, в результате во временной области наблюдается результат, соответствующий операции свертки импульсной характеристики канала (ИХК) с sinc-функцией. Значит аналогично этому, перемножение оконной функции с ИХК во временной области (рис. 1) приведет к эффекту растекания спектра в частотной области.

Рисунок 1 – Проявление эффекта растекания спектра

В итоге исследование методов оценки канала, предложенных авторами, на основе ДПФ выявило, что характеристики нормированных среднеквадратичных ошибок (NMSE) этих методов очень чувствительны к полосе когерентности беспроводных каналов. Если некоторые из частотных составляющих характеристики канала оказываются расположенными вне диапазона ширины полосы когерентности, крайние поднесущие вносят значительную ошибку [2].

2.2 Двумерная интерполяция в задаче оценки беспроводного радиоканала

В 2007 году проведено исследование методов двумерной (2D) интерполяции для оценки канала OFDM с помощью пилот-символов [3].

Так как сигнал OFDM является двумерной функцией времени и частоты, пилот-сигналы могут быть разбросаны как по времени, так и по частоте кадра OFDM. Путем выбора расстояний пилот-сигналов во временном и частотном направлениях,

достаточно малых по отношению к полосам частот когерентности канала, посредством интерполяции может быть получена оценка функции передачи канала в символах данных. Размещение пилот-сигналов как во временном, так и в частотном направлениях накладывает меньше служебных данных, это приводит к большей эффективности по сравнению с системами, использующими одну направленную компоновку, пилот-сигналов. С другой стороны, необходимо использовать двумерную интерполяцию/фильтрацию, которая является более сложной. Производительность одномерной интерполяции широко изучена. В этом исследовании цель состоит в том, чтобы сравнить рабочие характеристики частоты битовых ошибок (BER) двумерных методов интерполяции при оценке канала замирания в различных средах.

Лучшим линейным фильтром с точки зрения минимизации среднеквадратичной ошибки MSE является двумерный фильтр Винера [7]. Однако авторы рассматривают другие (нелинейные) методы двумерной интерполяции, такие как метод ближайшего соседа, метод билинейной интерполяции, бикубической интерполяции, метод 2D кубических сплайнов, которые часто используются в других приложениях, таких как обработка изображений.

В данном исследовании произведена оценка эффективности этих методов интерполяции для оценки канала OFDM в беспроводных каналах с быстрыми замираниями, в том числе при различных доплеровских смещениях. Произведено сравнение эффективности этих методов с методом двумерного фильтра Винера.

Рисунок 2 – Графики зависимости коэффициента ошибок (BER) от отношения сигнал/шум и величины доплеровского смещения соответственно

Исходя из проведенного исследования сделан вывод, что использование двумерной интерполяции в системе OFDM приводит к повышению ее эффективности. Если статистические параметры канала известны заранее, то оптимальным линейным интерполятором по критерию минимальной среднеквадратичной ошибки является 2D-фильтр Винера. Если априорная информация о параметрах неизвестна, то можно использовать другие известные 2D-интерполяционные методы. Чем выше плотность расположения поднесущих, тем более схожие результаты показывают 2D-интерполяционные методы и фильтр Винера.

2.3 Оценка канала OFDM при использовании технологии VLC

Организация систем беспроводной связи на основе видимого света в последнее время привлекает все больше внимания как один из методов устранения проблемы частотного ресурса радиосистем. Идея состоит в том, что видимый свет можно рассматривать не только как волну с точки зрения освещения помещений, но и как сигнал для оптической передачи данных. В технологии VLC (Visible Light

Communication) для передачи информации используется видимый свет в оптическом диапазоне примерно 400-800 ТГц. В 2016 году проведено исследование метода оценки канала в системах ACO-OFDM (Asymmetrically clipped optical OFDM) с технологией VLC [4]. Более подробно с технологией можно ознакомиться в работе [8]. Представлены результаты компьютерного моделирования метода оценки канала на основе пилот-несущих с применением различных схем интерполяции: линейной, кусочно-кубических полиномов Эрмита, сплайн-интерполяции, ФНЧ интерполирующего фильтра. Показано, что оценки каналов с различными методами интерполяции имеют одинаковую производительность для модуляций низкого порядка, таких как QAM-4. Однако, оценки на основе сплайнов и ФНЧ интерполирующего фильтра обеспечивают лучшую производительность для модуляции более высокого порядка (см. рис.3).

Рисунок 3 - Графики зависимости BER от отношения сигнал/шум для систем ACO-OFDM: а) при модуляции QAM-4; б) при модуляции QAM-64

Системы связи ACO-OFDM с технологией VLC в последнее время стали предметом многочисленных исследований, с которыми можно ознакомиться в работах [9, 10 и др.].

2.4 Гигабитная мобильная связь с использованием систем MIMO-OFDM

В [16] описана реализация экспериментальной системы мобильной связи со скоростью до 1 Гбит/с на основе MIMO-OFDM. Рассмотрены способы ускорения обработки сигнала в реальном времени за счет гибридной платформы FPGA/DSP (Digital Signal Processor - цифровые сигнальные процессоры, Field Programmable Gate Array - программируемые логические интегральные схемы). Этот подход позволит расширить количество поднесущих OFDM и количество антенн системы MIMO. Для общей скорости передачи данных 1 Гбит/с экспериментальная система сконфигурирована с 3 передающими и 5 приемными антеннами и использует 48 из 64 поднесущих OFDM. Все несущие образуют полосу канала в 100 МГц при частоте, несущей 5,26 ТГц.

В рассматриваемой системе MIMO-OFDM процесс передачи сигнала наиболее удобно выразить в частотной области следующей математической записью:

$$y_n = H_n x_n + v_n$$

где вектор x_n размерности $[n_{Tx} \times 1]$ содержит значения сигналов, передаваемые от всех T_x антенн на поднесущей OFDM с индексом $n = 1 \dots N$, и N обозначает количество поднесущих OFDM.

Векторы y_n и v_n размерности $[n_{Rx} \times 1]$ содержат значения принятых сигналов и значения шума на всех приемных антеннах соответственно. Целые числа n_{Tx} и n_{Rx} обозначают номера передатчиков и приемников соответственно. Матрица H_n размерности $[n_{Rx} \times n_{Tx}]$ содержит коэффициенты передачи канала для поднесущей n между каждой передающей и каждой приемной антенной. Данные коэффициенты можно вычислить, используя матрицу значений импульсной характеристики канала H_l

$$H_n = \sum_{l=0}^{L-1} H_l \exp(-j2\pi \frac{nl}{N})$$

где L – количество разрешенных многолучевых компонентов.

Передаваемые сигналы на каждой поднесущей могут быть восстановлены с использованием детектора, обеспечивающего минимальную среднеквадратичную ошибку

$$x_n = (H_n H_n^H + \sigma^2 I)^{-1} H_n^H y_n$$

где I – единичная матрица

$[n_{Tx} \times n_{Tx}]$; σ^2 – дисперсия шума на приемной антенне.

В экспериментальной системе авторы оценили все коэффициенты передаточной характеристики канала с помощью трех передающих и 5 приемных антенн системы ММО и 48 поднесущих, что дало $4 \times n_{Tx} \times n_{Rx} \times N = 2880$ коэффициентов передаточной характеристики канала. Данная схема обладает неотъемлемым преимуществом, заключающимся в том, что можно получить предварительную оценку коэффициентов всех поднесущих практически мгновенно после окончания последнего тестового символа.

Одним из примеров работы авторов можно привести схему интерполяции для улучшения оценок частотной характеристики канала. Она основана на элементарном соотношении между коэффициентами частотной характеристики канала и коэффициентами импульсной характеристики канала в системах OFDM.

В своей работе исследователи представили концепцию мобильной связи в режиме реального времени, которая подходит для скоростей передачи данных 1 Гбит / с на основе ММО-OFDM. Возможно, наиболее поразительной особенностью ММО-OFDM является то, что он легко масштабируется до более высокой полосы пропускания в результате чего требуемая сложность обработки сигнала увеличивается линейно с полосой пропускания (в том же канале) [6]. По этой причине сложность пространственно-временного кодирования уже может быть обработана с помощью доступных в настоящее время компонентов обработки сигналов для умеренного числа поднесущих и при низкой мобильности. Кроме того, тот же фундаментальный подход, который используется для узкополосных, можно применять и для широкополосных приложений.

Заключение

Оценка параметров канала связи в системах с OFDM модуляцией ставит новые задачи, некоторые частные решения которых были рассмотрены в данной статье. Совершенствование методов оценки канала является перспективным направлением для дальнейших исследований.

1. Junhui Zhao, Ran Rong, Chang-Heon Oh³ and JeongwookSeo, Member, KIICE. Analysis of the Effect of Coherence Bandwidth on Leakage Suppression Methods for OFDM Channel Estimation, J. Inf. Commun. Converg. Eng. 12(4): 221-227, Dec. 2014
2. J. Seo and D. K. Kim, "DFT-based interpolation with simpleleakage suppression," IEICE Electronic Express, vol. 8, no. 7, pp.525-529, Apr. 2011.

3. Amir H. Khanshan, HamidrezaAmindavar. Performance evaluation of two-dimensional interpolations on OFDM channel estimation. 2007 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference, December 2nd – 5th 2007, Christchurch, New Zealand
 4. HakanDogan, Osman Saylı, ErdalPanayirci. Pilot Assisted Channel Estimation for Asymmetrically Clipped Optical OFDM over Visible Light Channels, 2016 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)
 5. P. F. Driessen, L. J. Greenstein “Modulation techniques for high-speed wireless indoorsystems using narrowbeam antennas,” IEEE Transactions on Communications, Vol.43, No. 10, Oct. 1995.
 6. A. van Zelst, T. C. W. Schenk, "Implementation of a MIMO OFDM-based wirelessLANsystem", IEEE Transactions on Signal Processing, vol.52, no.2, pp.483-494, Feb. 2004.
 7. Höher P., Kaiser S. and Robertson P., “Two-dimensional pilot-symbolaided channel estimation by Wiener filtering,” in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP’97), Munich, Germany, pp. 1845–1848, April 1997.
 8. Longquan Chen, Ji Zhou, Yaojun Qiao, Zhitong Huang, and Yuefeng Ji Novel Modulation Scheme Based on Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Next-Generation Passive Optical Networks // Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 5, Issue 8, pp. 881-887 (2013)
 9. Zelalem Hailu Gebeyehu, Philip Kibet Langat, and Ciira Wa Maina. BER Performance of Stratified ACO-OFDM for Optical Wireless Communications over Multipath Channel // Journal of Computer Networks and Communications, Volume 2018
 10. Tsonev D., Sinanovic S., Haas H. Novel Unipolar Orthogonal Frequency Division Multiplexing (U-OFDM) for Optical Wireless; Proceedings of the 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring); Yokohama, Japan. 6–9 May 2012; pp. 1–5.
 11. M. Morelli and U. Mengali, “A comparison of pilot-aided channel estimation methods for OFDM systems,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 49, no. 12, pp. 3065-3073, Dec. 2001.
 12. X. Xiong, B. Jiang, X. Gao, and X. You, “DFT-based channel estimator for OFDM systems with leakage estimation,” IEEE Communications Letters, vol. 17, no. 8, pp. 1592-1595, Aug. 2013.
 13. K. J. Kim, H. G. Hwang, K. J. Choi, and K. S. Kim, “Lowcomplexity DFT-based channel estimation with leakage nulling for OFDM systems,” IEEE Communications Letters, vol. 18, no. 3, pp. 415-418, Mar. 2014.
 14. J. Seo and D. K. Kim, “DFT-based interpolation with simple leakage suppression,” IEICE Electronic Express, vol. 8, no. 7, pp. 525-529, Apr. 2011.
 15. J. Seo, S. Jang, J. Yang, W. Jeon, and D. K. Kim, “Analysis of pilot-aided channel estimation with optimal leakage suppression for OFDM systems,” IEEE Communications Letters, vol. 14, no. 9, pp. 809-811, Sep. 2010.
 16. Volker Jungnickel, Andreas Forck, Thomas Haustein, Christoph Juchems, “Gigabit mobile communications using real-time MIMO-OFDM signal processing”, MIMO System Technology for Wireless Communications, Chapter: 11, Publisher: CRC Press, Inc., Taylor and Francis, Editors: George Tsoulos, pp.315-352, Jan 2006
-