

УДК 621.391.8

Применение сигналов OCDM-OFDM с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты для предотвращения атак на физическом уровне

Карпухин Е.О.*, Макаренков Н.С.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: ret1987@yandex.ru*

***e-mail: nik.makarenkov95@gmail.com*

Статья поступила 27.06.2019

Аннотация

В работе предложено использовать сигналы OCDM-OFDM с ППРЧ для противодействия атакам на физическом уровне модели OSI и повышению структурной скрытности сигнала. Рассмотрена помехозащищенность от ретрансляционных помех, показатели структурной скрытности и влияние эффекта Доплера. Имитационное моделирование показало энергетический выигрыш в 1Дб при использовании предложенной сигнально-кодовой конструкции перед сигналами с OFDM-ППРЧ в условиях воздействия ретрансляционной помехи. Также показано, что сигналы данного типа обладают более высокими показателями структурной скрытности, а также более устойчивы к эффекту Доплера по сравнению с сигналами с OFDM-ППРЧ.

Ключевые слова: сигнально-кодовые конструкции OFDM, OCDM, ППРЧ, LDPC коды, эффект Доплера.

Введение

Атаки на физическом уровне модели OSI остаются актуальной проблемой для инфокоммуникационных систем. Особенно остро она проявляется в сетях специального назначения. Атаки на такие сети могут нанести огромный ущерб, в том числе в масштабах государства.

В [1] предложено использовать OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) [2,3] и псевдослучайную перестройку рабочей частоты (ППРЧ) [4] в условиях преднамеренных помех. В статье [5] проведено имитационное моделирование и обоснованы составляющие системы передачи данных с FH-OFDM [6], в которой возможно использование сигналов на основе OCDM (Orthogonal code-division multiplexing) для повышения защищенности от ретрансляционных помех.

Описание структуры сигнала

Особенность формирования OFDM сигнала заключается в следующем: входной поток данных разбивается на большое число низкоскоростных потоков, после чего каждый из них передается на собственной поднесущей частоте. Схематичное изображение спектра сигнала представлено на рисунке 1. Важным условием формирования OFDM сигнала является ортогональность полученных потоков. Она достигается путем введения защитного интервала, который называется циклическим префиксом.

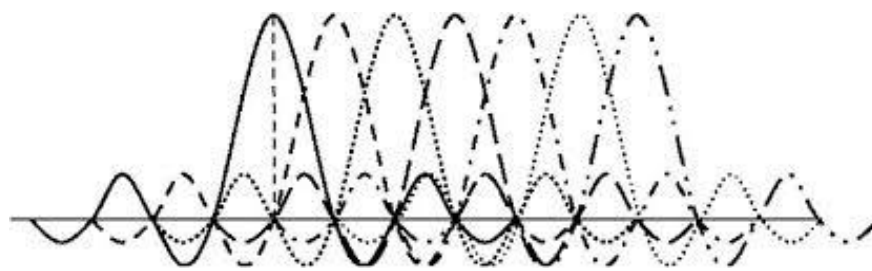


Рис. 1 – Спектр OFDM сигнала

Технология ОСДМ похожа на технологию расширения спектра посредством прямой последовательности (CDMA). Особенность технологии заключается в следующем: как и в технологии расширения спектра посредством прямой последовательности (CDMA или DS-CDMA) каждый бит (группа битов) информационного потока заменяется одной из ортогональных кодовых последовательностей (например, Уолша-Адамара). В результате один информационный бит оказывается представленным N кодовыми битами – так называемыми чипами, что формирует избыточность. Эти N бит распределяются по N каналам. В получившихся подканалах производится дополнительное кодирование посредством ортогональной циклической кодовой последовательности (например, M -последовательности) аналогично тому, как это происходит в технологии OFDM – только принцип разделения не частотный, а кодовый. Затем данные кодовые последовательности мультиплексируют в общий поток методом простого суммирования. Схема ОСДМ модуляции приведена на рисунке 2. В приемнике все происходит в обратном порядке: распределение входного сигнала на параллельные «чиповые» каналы, восстановление кодового потока бит, восстановление исходного информационного потока [7].

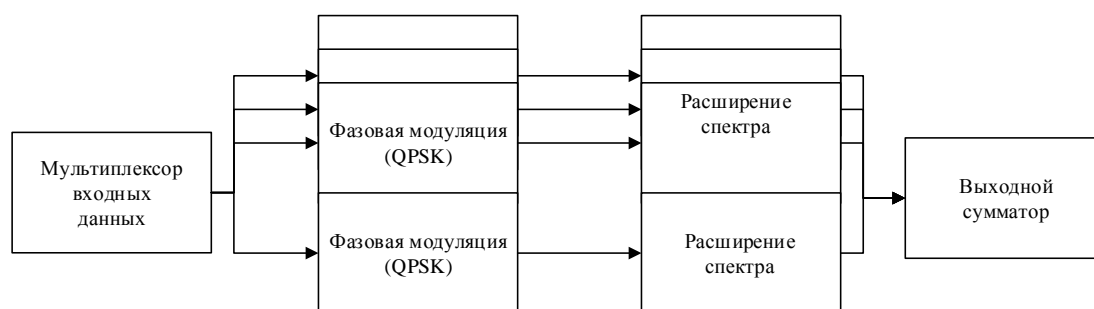


Рис. 2 – Схема OCDM модуляции

В данной работе предлагается использование OCDM модулятора до начала формирования OFDM сигнала. Схема формирования сигнала на передающей стороне и его обработки на приемной представлена на рисунке 3. Вначале цифровой сигнал кодируется с помощью LDPC (Low-density parity-check code, код с малой плотностью проверок на чётность) [8]. Особенностью данных кодов является малая плотность значимых элементов проверочной матрицы, за счёт чего достигается относительная простота реализации средств кодирования [9-12]. Кроме того, LDPC-коды обладают высокой корректирующей способностью, за счет чего повышается общая помехоустойчивость сигнала. После кодирования происходит перемежение сигнала, которое позволяет более эффективно бороться с пакетными ошибками. Затем применяется OCDM и OFDM модуляции, процесс которых был описан выше. Перед отправкой сигнала производится псевдослучайная перестройка рабочей частоты. Она необходима для того, чтобы эффективнее бороться с узкополосными помехами, так как частоты, на которых помеха наиболее сильная, можно перестать использовать. Кроме того, ППРЧ усложняет перехват сигнала злоумышленником. На приемной стороне процедура обработки сигнала происходит в обратном направлении.

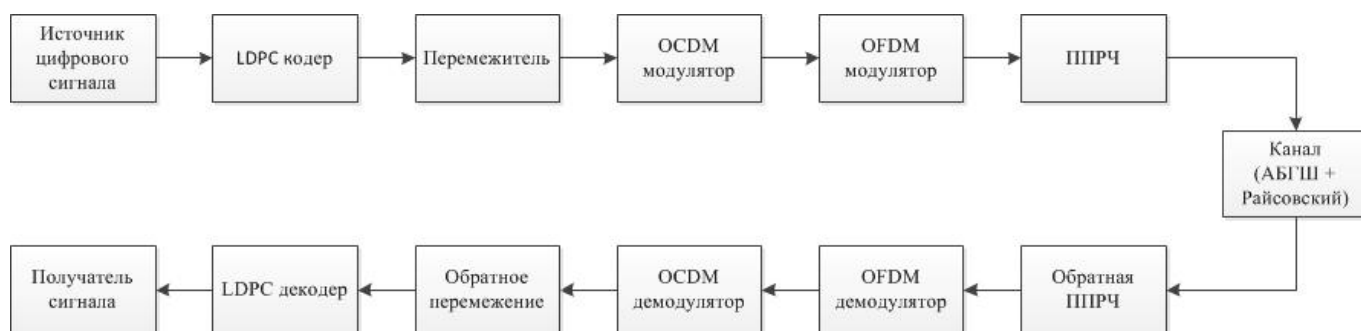


Рис. 3 – Схема формирования и обработки сигнала OCDM-OFDM с ППРЧ

Применение OCDM модулятора до начала формирования OFDM сигнала позволяет определить для каждой поднесущей свой кодовый признак, который к тому же будет ортогонален кодовым признакам других поднесущих. Добавление кодовых признаков приводит к тому, что даже при невозможности определения поднесущей по частоте, появляется возможность разделения их по кодовым признакам. Это должно привести к повышению защищенности от ретрансляционной помехи.

Свойства сигнала

Для подтверждения предположения о повышении защищенности от ретрансляционной помехи была создана имитационная модель [13] по схеме, изображенной на рисунке 3. Для имитации ретрансляционной помехи использовалась модель канала Райса. Данная модель канала применяется для того, чтобы проимитировать прямой ход сигнала, который испытывает большое количество помех от переотражения, что в данном случае выполняет роль ретрансляционной помехи. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.

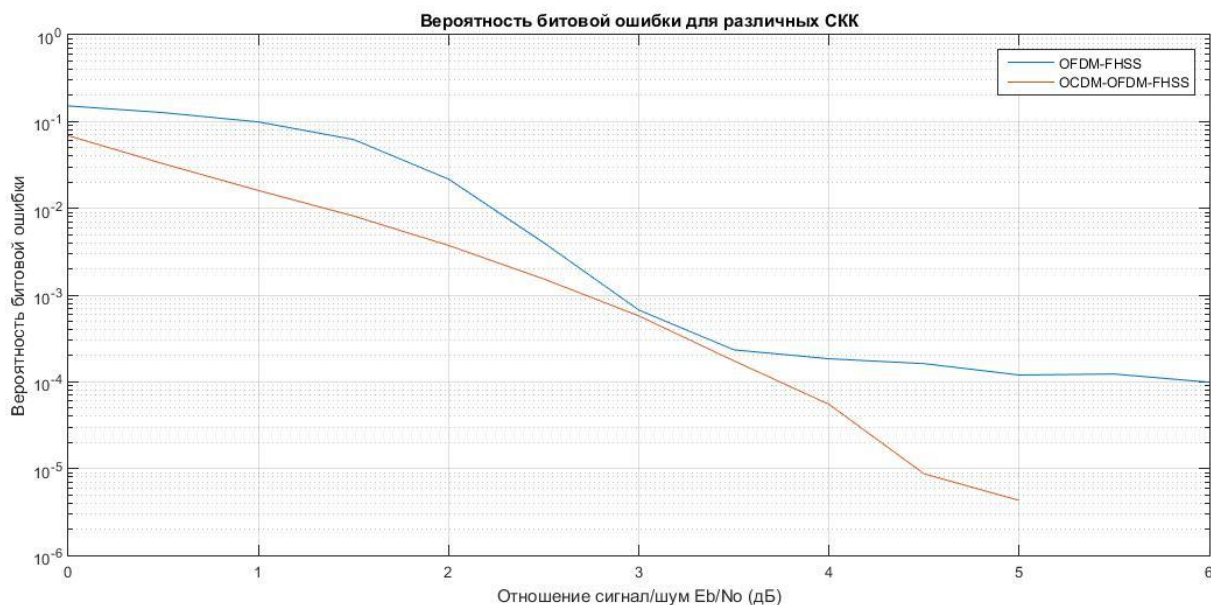


Рис. 4 – Результаты имитационного моделирования сигнально-кодовой конструкции на основе OCDM-OFDM с ППРЧ и LDPC

Как видно из графика, применение OCDM действительно приводит к повышению защищенности от ретрансляционной помехи. Причем, при уровне вероятности ошибки 10^{-4} выигрыш составляет более децибела. Таким образом, если существует вероятность появления ретрансляционных помех в канале связи, имеет смысл прибегнуть к применению данной технологии.

Кроме того, была создана имитационная модель для определения помехоустойчивости описанных сигналов в каналах, помеха в которых представлена только аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). Результаты моделирования представлены на рисунке 5.

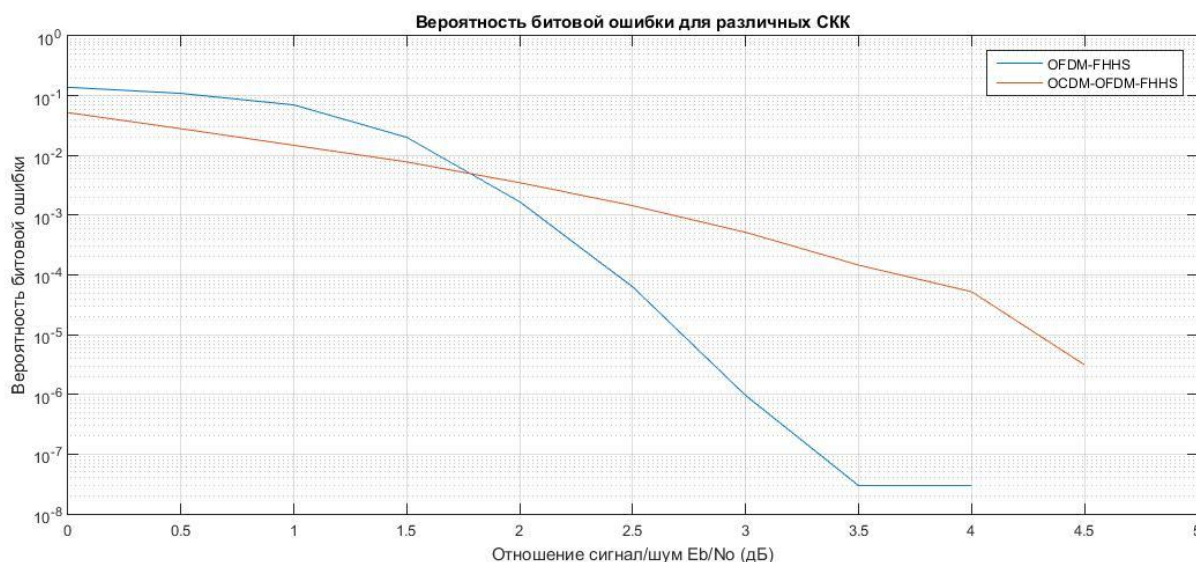


Рис. 5 – Результаты имитационного моделирования для канала с АБГШ

Как видно из графика, применение OCDM в случае, когда в канале отсутствует ретрансляционная помеха, является необоснованным, а также ухудшает качество приема сигнала. Наблюдается ситуация, противоположная рассмотренной ранее, т.е. при уровне вероятности битовой ошибки 10^{-4} данный тип сигнала проигрывает более децибела. Это связано с тем, что сигналы OFDM с ППРЧ сами по себе обладают высокой помехоустойчивостью. Дальнейшее же усложнение структуры приводит к появлению дополнительных ошибок декодирования.

Таким образом можно сделать вывод, что для применения сигнала с OCDM вместо OFDM с ППРЧ нужно быть уверенным в том, что в канале может возникнуть ретрансляционная помеха. В противном случае можно столкнуться с ситуацией, что качество сигнала даже ухудшится по сравнению с моментом, когда модуляция OCDM не применялась.

Стоит рассмотреть вариант вариативного подключения OCDM модулятора, т.е. в обычных условиях использовать чистый сигнал OFDM с ППРЧ. В те моменты, когда в канале возникает ретрансляционная помеха, выставленная

злоумышленником, подключать блок ОСДМ модулятора на передающей стороне и демодулятора на приемной с целью повышения помехозащищенности сигнала от ретрансляционной помехи.

Ещё одной значимой причиной использовать рассмотренные в данной статье сигналы является их высокая скрытность. Под скрытностью средств радиосвязи понимают способность противостоять действиям радиотехнической разведки, направленным на обнаружение сигналов, измерение параметров и определение направления их прихода [14]. Выделяют энергетическую, структурную, информационную, временную и пространственную скрытность. Структурная скрытность [15] направлена на исключение или существенное затруднение вскрытия структуры (вида) сигналов средства радиосвязи. Структура сигнала определяется способом кодирования и модуляции.

В [16] показано, что сигналы OFDM с ППРЧ обладают высокой структурной скрытностью, что связано с большим количеством поднесущих частот, а также с большим числом степеней свободы сигнала с ППРЧ. Использование же технологии ОСДМ приводит к усложнению структуры сигнала. Это в свою очередь усложняет процедуру анализа для злоумышленника, так как даже после выделения OFDM сигнала у каждой поднесущей будет свой кодовый признак, присутствие которого в сигнале достаточно сложно определить. Все вышесказанное позволяет еще больше увеличить структурную скрытность.

В [17] описано влияние эффекта Доплера на сигнал OFDM. В частности, показано, что при смещении частоты несущего колебания на значения большие чем

два процента от интервала между поднесущими приводит к тому, что точки модуляционного созвездия выходят за пределы своего квадранта, поэтому невозможно произвести безошибочную демодуляцию сигнала.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда каждой поднесущей OFDM сигнала присвоен кодовый признак в виде OCDM символа. Так как структура сигнала заранее известна приемной стороне, можно разделить поднесущие принятого сигнала, основываясь на их кодовых признаках. После этого произвести корректировку частоты не составит труда, а следовательно, количество ошибок, возникших вследствие влияния эффекта Доплера, значительно снизится.

К минусам данного подхода можно отнести увеличение сложности систем формирования сигнала и синхронизации приемника и передатчика. В процессе формирования сигнала необходимо обеспечить, чтобы каждой поднесущей OFDM сигнала был назначен кодовый признак из ранее сформированного OCDM. Кроме того, сам по себе процесс псевдослучайной перестройки рабочей частоты довольно сложен и требует хорошей синхронизации между приемником и передатчиком, а также знание псевдослучайной последовательности [18]. Добавление же OCDM приводит к тому, что принимающей стороне нужно также сообщить об используемых кодовых признаках. Кроме того, как было показано выше, в случае, когда в канале присутствует только аддитивный белый гауссовский шум, а ретрансляционная помеха отсутствует, данный тип сигналов показывает худшие характеристики, чем сигналы OFDM с ППРЧ.

Заключение

Подводя итоги, можно выделить следующие основные моменты:

- сигналы OCDM-OFDM с ППРЧ показывают лучшие показатели помехозащищенности от ретрансляционной помехи, чем сигналы OFDM с ППРЧ;
- сигналы этого типа обладают высокими показателями структурной скрытности;
- сигналы этого типа устойчивы к воздействию эффекта Доплера;
- если единственным источником помех в канале является аддитивный белый гауссовский шум, то использование сигналов данного типа не является обоснованным;
- использование сигналов OCDM-OFDM с ППРЧ приводит к усложнению приемопередающей аппаратуры.

Из этого следует, что сигналы OCDM-OFDM с ППРЧ могут найти свое применение в инфокоммуникационных системах, для которых важно предотвращать атаки на физическом уровне модели OSI в виде ретрансляционных помех [19,20], а также обеспечивать структурную скрытность сигнала.

Библиографический список

1. Приступа В.В., Зайцев С.В. Исследование характеристик помехозащищенности беспроводных сетей с сигналами OFDM с внутрибитовой псевдослучайной перестройкой поднесущих частот в условиях установки оптимальных помех // Математические машины и системы. 2015. № 1. С. 84 - 95.

2. Кузнецов В.С., Волков А.С., Солодков А.В., Слепов А.В. Исследование OFDM с первичной амплитудно-фазовой амплитудно-импульсной модуляцией с частотной эффективностью 10 бит/отсчет // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102149>
3. Кузнецов В.С., Волков А.С., Соковиков С.А. Исследование сигналов OFDM с первичной амплитудной фазовой – амплитудной импульсной модуляцией // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=97021>
4. Филатов В.И., Борукаева А.О., Бердиков П.Г., Кулаков Д.В. Разработка методов различения сложных помехоустойчивых сигналов // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104188>
5. Карпухин Е.О., Мазепа Р.Б., Михайлов В.Ю. Исследование перспективных сигнально-кодированных конструкций на основе FH-OFDM при воздействии Доплеровского сдвига частоты // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8. № 1. С. 12 - 16.
6. L. Wang and B. Jezek. Ofdm modulation schemes for military satellite communications // Military Communications Conference, MILCOM 2008, IEEE, December 2008. DOI: [10.1109/MILCOM.2008.4753506](https://doi.org/10.1109/MILCOM.2008.4753506)
7. Orthogonal code division multiplex CCK (OCDM-CCK) method and apparatus for high data rate wireless LAN: Patent US 8130814B2 / Ram Sivaswamy, Pradeep Siva Swamy, date: Mar. 6, 2012.
8. Gallager R.G. Low Density Parity Check Codes, Cambridge, MA, MIT Press, 1963, 90 p.

9. Mohamed Adnan Landolsi. A Comparative Performance and Complexity Study of Short-Length LDPC and Turbo Product Codes // Information and Communication Technologies, ICTTA '06, 2006, vol. 2. DOI: [10.1109/ICTTA.2006.1684775](https://doi.org/10.1109/ICTTA.2006.1684775)
10. Thomas R. Halford, Metin Bayram, Cenk Kose, Keith M. Chugg, Andreas Polydoros. The F-LDPC Family: High-Performance Flexible. Modern Codes for Flexible Radio // Spread Spectrum Techniques and Applications, ISSSTA '08, September 2008, DOI: [10.1109/ISSSTA.2008.75](https://doi.org/10.1109/ISSSTA.2008.75)
11. D.P. Rathod, R.N. Awale. Short-Cycle Reduction Algorithm in Parity-Check Matrix of an Irregular LDPC code to Improve Error Floor Rate and Computational Complexity // International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), 2014, vol. 1, issue 7, available at: <http://www.ijirae.com/volumes/vol1/issue7/AUEE10086.35.pdf>
12. Luca Barletta and Arnaldo Spalvieri. Design of Short, High-Rate DVB-S2-Like Semi-Regular LDPC Codes // Research Letters in Communications, vol. 2008, Article ID 324503, available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2008/324503>
13. Осипов Н.А., Шавин А.С., Тарасов А.Г. Модели каналов передачи информации автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения в среде Simulink // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62255>
14. Лебедев Ю.И. Системы широкополосного доступа 4 поколения: выбор сигнально-кодовых конструкций // Первая миля. 2010. № 5–6. С. 56 – 59.

15. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. – М.: Радио и связь, 2003. – 640 с.
16. Бабинцев Е. С., Лянгузов К. А. Структурная скрытность сложного сигнала с ППРЧ // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2007. № 3. С. 57 - 58.
17. Майков Д. Ю., Вершинин А. С. Влияние эффектов Доплера на OFDM сигнал // Молодой ученый. 2014. № 21 (80). С. 175 - 179.
18. M. Strasser, C. Pöpper, S. Capkun. Efficient Uncoordinated FHSS Anti-jamming Communication // MobiHoc '09 Proceedings of the tenth ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, 2009, pp. 207 - 218.
19. M. Lichtman, J.D. Poston, S. Amuru, C. Shahriar, T.C. Clancy, R.M. Buehrer, J.H. Reed. A communications jamming taxonomy / IEEE Security & Privacy, 2016, vol. 14, no. 1, pp. 47 – 54.
20. L. Ding, R. Li, Y. Wang, L. Dai, F. Chen. Discrimination and identification between mainlobe repeater jamming and target echo by basis pursuit // IET Radar, Sonar & Navigation, January 2017, vol. 11, issue 1, pp. 11 – 20.