

Сравнение OFDM и FBMC в системах с модуляцией интенсивности и прямым детектированием

А. А. Чекирева¹, А. С. Овсянникова², С. В. Завьялов³, Б. И. Положинцев⁴

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

¹chekireva_aa@spbstu.ru, ²ovsyannikova_as@spbstu.ru, ³zavyalov_sv@spbstu.ru, ⁴borisp@spbstu.ru

Аннотация. Для использования в волоконно-оптических системах связи часто рассматривают сигналы с ортогональным частотным мультиплексированием и циклическим префиксом (CP-OFDM) и многочастотные сигналы на основе банка фильтров (FBMC). В данной работе была выполнена оценка энергетической эффективности CP-OFDM и FBMC сигналов в волоконно-оптических системах с модуляцией интенсивности и прямым детектированием при фиксированной скорости передачи. Предварительно были получены эффективные значения набора параметров для каждого типа сигнала, таких как количество информационных поднесущих, размер преобразования Фурье и постоянная составляющая лазера, минимизирующее отношение сигнал/шум при вероятности битовой ошибки 10^{-2} . Показано, что в канале с хроматической дисперсией FBMC сигналы обеспечивают энергетический выигрыш более 1 дБ при скорости передачи 60 Гб/с.

Ключевые слова: FBMC; CP-OFDM; оптический канал; хроматическая дисперсия; фильтр Бесселя; модуляция интенсивности и прямое детектирование

I. ВВЕДЕНИЕ

Технология с ортогональным частотным мультиплексированием (OFDM) используется во многих системах связи. Волоконно-оптические каналы связи не стали исключением из-за высокой спектральной эффективности OFDM-сигналов, их устойчивости к дисперсии волокна и вычислительно простой корректировки эффектов канала [1–4]. Однако использование циклического префикса (CP-OFDM) для борьбы с межсимвольной интерференцией (МСИ) ухудшает спектральную эффективность.

Помимо OFDM, в оптических коммуникационных системах могут также применяться сигналы с частотным мультиплексированием с использованием банка фильтров (FBMC). В FBMC сигналах используются фильтры-прототипы с хорошей частотно-временной локализацией [5–7]. Невозможно одновременно обеспечить хорошую частотно-временную локализацию и удовлетворить требованиям ортогональности. Условие ортогональности можно свести к ортогональности в поле действительных чисел, заменяя квадратурную амплитудную модуляцию (QAM) на QAM со смещением (OQAM) [8]. FBMC сигналы могут обеспечить более высокую более высокую спектральную эффективность по сравнению с OFDM сигналами, поскольку не используют циклический префикс для борьбы с МСИ [5].

В данной статье предлагается сравнить помехоустойчивость приема FBMC и OFDM сигналов в системах с модуляцией интенсивности и прямым детектированием (IMDD) в условиях фиксированной скорости передачи данных. Статья организована следующим образом. В разделе II описывается система IMDD с фиксированной скоростью передачи данных, а также модулятор и демодулятор FBMC. Имитационная модель и параметры моделирования представлены в разделе III. Результаты имитационного моделирования представлены в разделе IV. Выводы приведены в разделе V.

II. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Одна из особенностей IMDD системы – использование цифровых сигналов для управления лазерным источником. Для этого сигнал должен быть вещественным и положительным. Используя свойство эрмитовой симметрии, мы можем получить вещественный сигнал [1]:

$$\begin{cases} X(-n) = X^*(n), n = 1, \dots, N/2 - 1 \\ X(-N/2) = 0 \end{cases},$$

где $X(n)$ – модуляционный символ на n -ой поднесущей, $*$ – комплексное сопряжение, N – размер преобразования Фурье. Видно, что для передачи данных используется $N/2 - 1$ поднесущая.

Для обеспечения положительности сигнала $s(t)$ к нему прибавляется ток смещения (direct current), который определяет постоянную составляющую лазера (μ – коэффициент пропорциональности, $DC_{дБ}$ – смещение, равное $10 \lg(\mu^2 + 1)$ дБ) [1]:

$$s_{DC}(t) = s(t) + DC,$$

$$DC = \mu \sqrt{E\{s^2(t)\}}, \quad (1)$$

$$\mu = \sqrt{10^{DC_{дБ}/10} - 1}, \quad (1)$$

При работе в условиях фиксированной скорости передачи данных достижение целевой скорости осуществляется путем распределения сигнальных созвездий разных размеров по поднесущим. Для упрощения ограничимся двумя размерами сигнальных созвездий. Логично размещать на поднесущих, близких к нулевой частоте, символы с большим размером сигнального созвездия. Например, на первых 100 поднесущих QAM-64, а на остальных – QAM-16 [9].

Ещё одной особенностью IMDD системы является клиппирование. Клиппирование позволяет избежать перехода полупроводникового диода, используемого в качестве источника лазерного излучения, в режим насыщения из-за высокого пик-фактора многочастотных сигналов [3], [4], [10].

Рассмотрим процедуру формирования многочастотных сигналов в IMDD системах

А. Формирование CP-OFDM сигналов в IMDD системах

Блок-схема формирования вещественного CP-OFDM сигнала представлена на рис. 1:

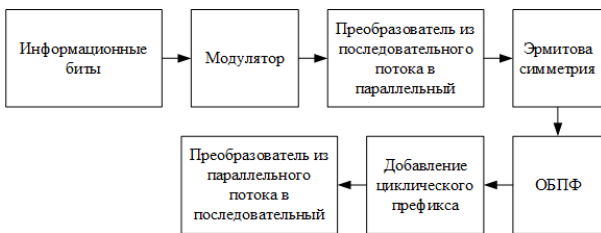


Рис. 1. Блок-схема формирования CP-OFDM сигнала

Математически комплексную огибающую CP-OFDM сигнала можно представить следующим образом:

$$s(t) = \sum_{m=0}^{N_s-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} X_{m,n} e^{j2\pi f_n t},$$

где N_s – количество модуляционных QAM символов, N – количество поднесущих, $X_{m,n}$ – комплексный символ канального алфавита, передаваемый на n -ой поднесущей в m -ом символьном интервале, $f_n = n/T$ – частота n -ой поднесущей, T – длительность OFDM символа [9].

В. Формирование FBMC сигналов в IMDD системе

Благодаря низкому уровню боковых лепестков фильтров-прототипов FBMC ортогональность требуется только между соседними поднесущими. Чтобы эффективно использовать полосу пропускания канала, модуляция поднесущих должна быть адаптирована к ограничению ортогональности [8]. Для этого предлагается перейти к модуляции OQAM. При этом количество модуляционных символов увеличивается вдвое по сравнению с модуляцией QAM, и для сохранения скорости передачи требуется уменьшить вдвое символьный интервал во времени. Совместное использование банка фильтров и модуляции OQAM позволяет исключить циклический префикс без потерь в энергетической эффективности [6].

Блок-схема передатчика на основе вещественных сигналов FBMC/OQAM показана на рис. 2. Для снижения вычислительной сложности применяется метод полифазной обработки (PPN).

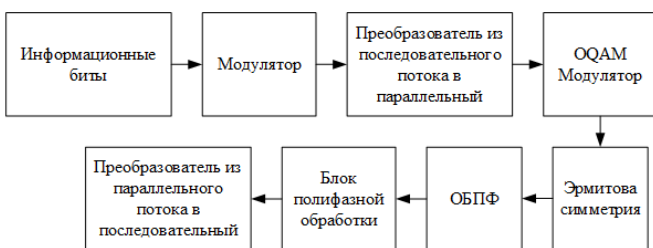


Рис. 2. Схема формирования FBMC/OQAM для метода PPN

Математически комплексную огибающую FBMC/OQAM сигнала $s(t)$ можно записать следующим образом:

$$s(t) = \sum_{m=0}^{2N_s-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} Y_{m,n} p\left(t - \frac{mT}{2}\right) e^{j2\pi f_n t},$$

где $Y_{m,n}$ – символ OQAM, передаваемый на n -ой поднесущей в течение m -го символьного интервала, $p(t)$ – характеристика фильтра-прототипа [7].

В FBMC сигналах в качестве фильтра-прототипа используется импульс вида PHUDYAS, который можно записать следующим образом:

$$p(t) = 1 + \sum_{k=1}^{K-1} p_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{KT}\right),$$

где K – коэффициент перекрытия, p_k – k -ый коэффициент фильтра-прототипа PHUDYAS. Коэффициенты p_k для разных K можно посмотреть в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Коэффициенты фильтра-прототипа PHUDYAS

K	p_0	p_1	p_2	p_3
2	1	$\sqrt{2}/2$	-	-
3	1	0.911	0.411	-
4	1	0.972	$\sqrt{2}/2$	0.235

III. ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Схема имитационной модели представлена на рис. 3. Модель можно разделить на электрическую и оптическую части. В электрической части генерируется цифровой вещественный сигнал (CP-OFDM или FBMC), затем происходит клиппирование сигнала. Сигнал подвергается цифро-аналоговому преобразованию (ЦАП). Затем аналоговый сигнал проходит через фильтр групповой задержки, учитывающий особенности оптоэлектрической части системы, и фильтр Бесселя, имитирующий ограниченную полосу пропускания электрических цепей [9], [11].

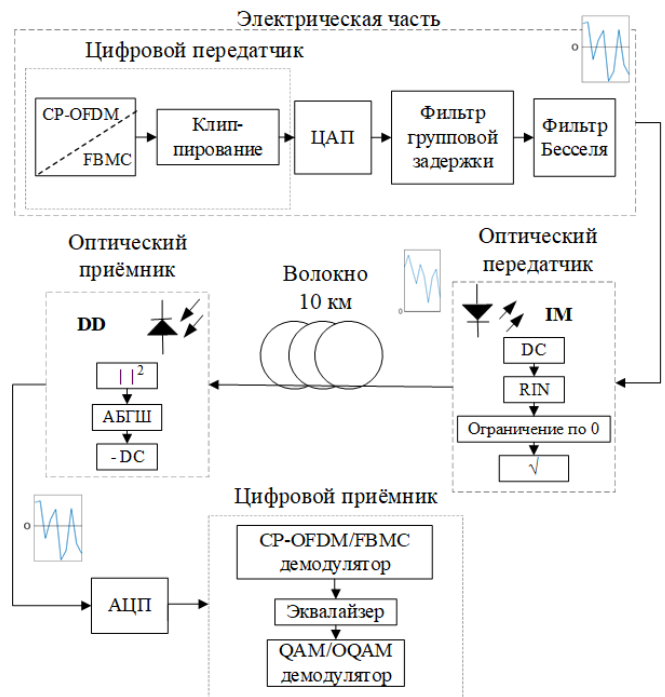


Рис. 3. Блок-схема имитационной модели IMDD системы

На входе оптического передатчика сигнал биполярный. После добавления к сигналу постоянной составляющей лазера и последующего клиппирования по нулевому уровню сигнал становится неотрицательным. В данной модели нулевой уровень соответствует пороговому току лазера. Учитывается также влияние шума относительной интенсивности лазера (RIN). Для корректной модуляции интенсивности из полученного сигнала извлекается квадратный корень [10, 12].

Пройдя через одномодовое волокно, сигнал поступает на вход фотодиода, который работает как квадратичный детектор [12, 13]. Тепловой шум фотодиода моделируется на основе аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ). На выходе оптического приемника вычитается постоянная составляющая лазера. Биполярный сигнал проходит через аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

В данной работе АЦП и ЦАП считаются идеальными и не вносят искажений в сигнал. Демодуляция оцифрованного сигнала выполняется с помощью эквалайзера. Пилотные поднесущие не используются, поскольку предполагается идеальное знание канала.

Ниже приведены параметры моделирования: $F_s = 40$ ГГц – частота дискретизации, $R = 60$ Гб/с – скорость передачи данных, $RIN = -140$ дБ/Гц – относительный шум интенсивности лазера, $\lambda = 1550$ нм – длина волны лазера, $d = 10$ км – длина волокна, $D = 17$ пс/(нм·км) – параметр хроматической дисперсии, $K = 4$ – коэффициент перекрытия. На передатчике сигнал клиппируется по уровню пик-фактора 8 дБ.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате имитационного моделирования были получены кривые помехоустойчивости приема, вычисленные для различных значений параметров системы (количество информационных поднесущих ИП, размер БПФ, уровень постоянной составляющей лазера, размер циклического префикса). Используя эти кривые, мы можем оценить эффективные значения параметров, минимизирующие ОСШ при $BER = 10^{-2}$, и затем сравнить энергетическую эффективность CP-OFDM и FBMC.

Выделим два сценария. Первый предполагает идеальный канал ($D = 0$ пс/(км·нм)), второй – канал с хроматической дисперсией ($D = 17$ пс/(км·нм)). При использовании идеального канала возможно оценить влияние фильтра Бесселя и фильтра групповой задержки на сигнал. Второй сценарий включает в себя в том числе и эффекты, вызванные хроматической дисперсией.

Определим длину циклического префикса для сигнала CP-OFDM, которая обеспечивает наименьшее ОСШ при $BER = 10^{-2}$. Исследование выполнено для размера БПФ 512, количество информационных поднесущих 210, $\mu = 10$. Из рис. 4 видно, что наименьшее значение ОСШ достигается при длине циклического префикса CP, равной 10 отсчётам. При значении меньше 10 отсчетов большее влияние на сигнал оказывают межсимвольные помехи. Когда значение больше 10, количество информационных поднесущих с большим размером сигнального созвездия увеличивается, что приводит к ухудшению BER. Для дальнейших исследований важно зафиксировать отношение длины циклического префикса к длине символа OFDM. В нашем случае это 10/512.

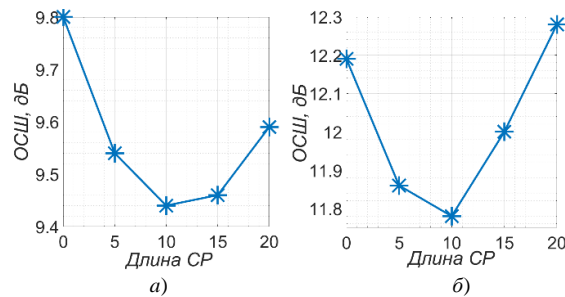


Рис. 4. Зависимость ОСШ от длины циклического префикса CP: а) идеальный канал, б) канал с хроматической дисперсией

Рассмотрим зависимость ОСШ от количества информационных поднесущих (ИП) при $BER = 10^{-2}$ (рис. 5). Как и в предыдущем случае, размер БПФ равен 512. Для OFDM используется циклический префикс CP=10 отсчетов. Большее число ИП приводит к большему затуханию, вызванному на границах частотного диапазона фильтром Бесселя и хроматической дисперсией. В то же время меньшее число ИП требует использования сигнальных созвездий большего размера для достижения заданной скорости передачи. Согласно результатам, эффективное число ИП для CP-OFDM и FBMC составляет 210 для идеального канала. Однако для канала с хроматической дисперсией эффективное число ИП различается (200 для CP-OFDM и 190 для FBMC).

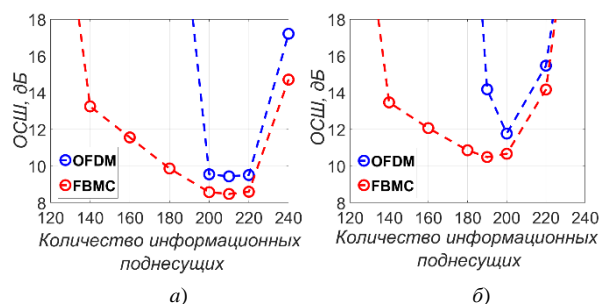


Рис. 5. Зависимость ОСШ от количества информационных поднесущих: а) идеальный канал, б) канал с хроматической дисперсией

Влияние размера БПФ на значение ОСШ показано на рис. 6. Данные графики были получены при фиксированном отношении количества ИП к размеру БПФ. Для OFDM также было зафиксировано отношение длительности циклического префикса к размеру БПФ. Например, в предыдущем случае с БПФ равным 512, количество ИП равнялось 210 и циклический префикс имел длину 10 для CP-OFDM, поэтому для размера БПФ 1024 мы используем 420 ИП и длину циклического префикса 20.

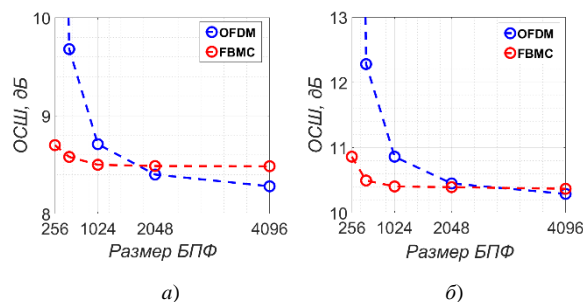


Рис. 6. Зависимость ОСШ от размера БПФ: а) идеальный канал, б) канал с хроматической дисперсией

Большой размер БПФ трудно реализуем и увеличивает энергопотребление приёмопередатчика. Видно, что помехоустойчивость сигналов CP-OFDM более чувствительна к размеру БПФ по сравнению с FBMC (рис. 6). Значение меньше 1024 дает значительные энергетические потери. Поскольку энергетический выигрыш за счет увеличения размера БПФ от 1024 до 2048 не превышает 0,5 дБ, предлагается выбрать размер БПФ 1024 для всех сигналов в обоих сценариях.

Рассмотрим влияние постоянной составляющей лазера, определяемой μ (1), на значение ОСШ. При высоких значениях оптическая мощность увеличивается, что приводит к увеличению относительного шума интенсивности (RIN) лазера. И наоборот, при низких значениях оптической мощности в сигнале могут сохраняться отрицательные значения, что может привести к нелинейным искажениям. Минимальное ОСШ достигается при $\mu = 11$ как для CP-OFDM, так и для FBMC в идеальном канале. Для канала с хроматической дисперсией $\mu = 13$ для CP-OFDM и $\mu = 11$ для FBMC (рис. 7).

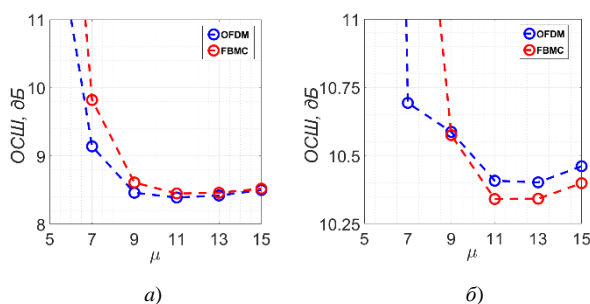


Рис. 7. Зависимость ОСШ от уровня постоянной составляющей лазера: а) идеальный канал, б) канал с хроматической дисперсией

С учетом полученных эффективных значений параметров построим кривые помехоустойчивости приема сигналов CP-OFDM и FBMC в идеальном канале и в канале с хроматической дисперсией (рис. 8). Энергетический выигрыш, обеспечиваемый FBMC при $BER=10^{-2}$, составляет 0,24 дБ для идеального канала и 1,11 дБ для канала с хроматической дисперсией. Отметим, что при $BER=10^{-3}$ выигрыш достигает 1 дБ и более 3 дБ соответственно.

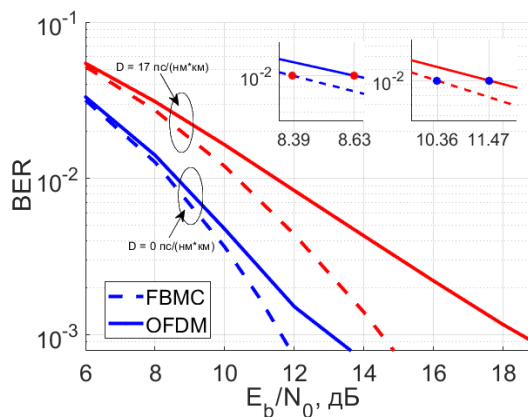


Рис. 8. График с кривыми помехоустойчивости с использованием найденных эффективных параметров

V. ВЫВОДЫ

В данной статье были получены эффективные значения параметров, минимизирующие отношение сигнал/шум в условиях фиксированной скорости передачи данных в системах IMDD с CP-OFDM и FBMC. Показано, что за счет исключения циклического префикса FBMC позволяет получить энергетический выигрыш около 1 дБ при $BER=10^{-2}$. При $BER=10^{-3}$ выигрыш может превышать 3 дБ.

Энергетический выигрыш может быть увеличен при увеличении длины оптического волокна, когда эффект хроматической дисперсии становится более выраженным, а также за счет применения более сложной схемы распределения мощности по поднесущим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] S.D. Dissanayake and J. Armstrong, "Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems," // Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 7, pp. 1063-1072, April, 2013, doi: 10.1109/JLT.2013.2241731.
- [2] M. Chen et al., "Precoding-Enabled FBMC/OQAM for Short-Reach IMDD Transmission," // IEEE Photonics Technology Letters, vol. 33, no. 23, pp. 1305-1308, 1 Dec.1, 2021, doi: 10.1109/LPT.2021.3118838.
- [3] D. Tsonev, S. Sinanovic and H. Haas, "Complete Modeling of Nonlinear Distortion in OFDM-Based Optical Wireless Communication," // Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 18, pp. 3064-3076, Sept.15, 2013, doi: 10.1109/JLT.2013.2278675.
- [4] Tuan Anh Truong, Hao Lin, B. Jahan, M. Arzel and M. Jezequel, "PAPR reduction using contiguous-tone Tone Reservation technique in optical OFDM IMDD transmissions," // 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), Anaheim, CA, USA, 2013, pp. 1-3.
- [5] K.A. Alaghbari, H.-S. Lim and T. Eltaif, "Compensation of Chromatic Dispersion and Nonlinear Phase Noise Using Iterative Soft Decision Feedback Equalizer for Coherent Optical FBMC/OQAM Systems," // Journal of Lightwave Technology, vol. 38, no. 15, pp. 3839-3849, 1 Aug.1, 2020, doi: 10.1109/JLT.2020.2981481
- [6] T. Jiang, D. Chen, C. Ni, and D. Qu, QAM/FBMC for Future Wireless Communications: Principles, Technologies and Applications. Cambridge, MA, USA: Elsevier, 2017
- [7] W. Jiang, T. Kaiser, F. Luo, and C. Zhang, "From OFDM to FBMC: Principles and comparisons," // Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016, pp. 48-66.
- [8] M. Bellanger, D. Le Ruyet, D. Roviras, M. Terré, J. Nossek, L. Baltar, et al., "FBMC physical layer: a primer," PHYDYAS, January, 2010.
- [9] A. Chekireva, A. Ovsyannikova and S. Zavjalov, "Analysis of BER Performance of the Fiber-optic Communication System with IMDD when using CP-OFDM Signals," // 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St. Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 174-177, doi: 10.1109/EExPolytech56308.2022.9950992
- [10] A.E. Willner, "Optical Fiber Telecommunications VII", Academic Press, Cambridge, MA, USA, 2020.
- [11] C. Zhang, M. Chen and J. Wang, "Design and Implementation of Real Time Crossover Based on Bessel Digital Filter," // 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2010, pp. 954-957, doi: 10.1109/ICMTMA.2010.567
- [12] Щербakov В.В., Солodков А.Ф., Задерновский А.А. Передача сигналов модуляции интенсивности света в аналоговых волоконно-оптических линиях связи // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2016. №1. С. 9-24.
- [13] Варданян В.А. Имитационное моделирование процесса передачи OFDM сигналов по дисперсионному волоконно-оптическому тракту // Т-сomm: Телекоммуникации и Транспорт. 2017. № 11. С. 18-24.