

Повышение помехоустойчивости длинных оптических IMDD-линий за счёт синтеза оптимального фильтра FBMC/OQAM

А. С. Бексаев

Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого

beksaev_as@spbstu.ru

С. В. Завьялов

Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого

zavyalov_sv@spbstu.ru

Аннотация. В оптических линиях связи с прямой модуляцией и детектированием (IMDD) длиной более 50 км хроматическая дисперсия вызывает сильную межсимвольную интерференцию. Классический формат CP-OFDM обладает высоким уровнем внеполосных излучений, снижающим спектральную эффективность. Целью работы является синтез оптимального формирующего фильтра для системы FBMC/OQAM, обеспечивающего максимальное подавление внеполосных излучений при заданной устойчивости к дисперсионным искажениям. Методом численной оптимизации синтезирован формирующий фильтр, который по сравнению с эталонным фильтром RNYDYAS обеспечивает снижение уровня внеполосных излучений на 11.8 дБ в дисперсионном канале. Предлагаемое решение повышает спектральную эффективность и дальность передачи в экономичных IMDD системах.

Ключевые слова: FBMC/OQAM, IMDD, формирующий фильтр, хроматическая дисперсия, спектральная эффективность

I. ВВЕДЕНИЕ

Модуляционная схема на основе банка фильтров (FBMC) рассматривается как одна из ключевых технологий для систем связи следующих поколений (beyond-5G/6G). Её преимущества заключаются в высокой спектральной эффективности и низком уровне побочных излучений [1]. В последнее время FBMC привлекает внимание и для применения в оптических системах передачи данных [2], особенно в архитектурах, использующих простую прямую модуляцию интенсивности и прямое детектирование (IMDD). Подобные архитектуры особенно востребованы в экономичных сегментах сетей, таких как городские и абонентские сети доступа (например, PON), где ключевыми требованиями являются низкая стоимость и энергопотребление [3]. Однако в IMDD-системах возникают существенные проблемы, связанные с воздействием хроматической дисперсии оптического волокна. Это явление вызывает временное расплывание и наложение оптических импульсов, что приводит к межсимвольной интерференции и, как следствие, ограничивает максимальную дальность передачи без применения дорогостоящих систем компенсации [4]. Классический подход с использованием мультиплексирования с ортогональными поднесущими и циклическим префиксом (CP-OFDM), хотя и широко распространён, имеет ряд недостатков. В частности, введение циклического префикса напрямую снижает

спектральную эффективность, а необходимость сложных алгоритмов компенсации дисперсии повышает вычислительную сложность и стоимость реализации. Технология FBMC, в частности её вариант FBMC/OQAM, предлагает альтернативу. Использование метода OQAM (со сдвигом квадратур) позволяет обеспечить ортогональность соседних поднесущих и символов без необходимости в циклическом префиксе. Кроме того, применение специальных формирующих фильтров к каждой поднесущей (например, фильтра RNYDYAS [5]) обеспечивает более резкое частотное разделение и лучшее подавление внеполосных излучений по сравнению с OFDM. Это делает FBMC/OQAM перспективной для создания оптических каналов, более устойчивых к дисперсионным искажениям [6–7]. Целью настоящего исследования является разработка, синтез и оценка характеристик специального формирующего фильтра для систем FBMC/OQAM, оптимизированного для работы в протяжённых (>50 км) оптических IMDD-линиях связи с учётом влияния хроматической дисперсии.

II. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ И МЕТОДИКА СИНТЕЗА ФИЛЬТРА

В качестве объекта исследования рассматривается модель системы FBMC-OQAM, адаптированной для работы в оптической линии с прямым детектированием (рис. 1).

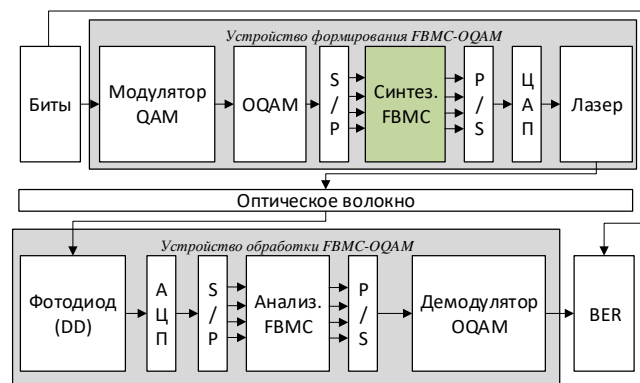


Рис. 1. Карта межсимвольной и межканальной интерференции в системе FBMC/OQAM: а) исходная последовательность; б) результат при низком пороге ϵ_{ISI} в) результат при высоком пороге ϵ_{ISI}

На передающей стороне комплексные символы, соответствующие сигнальному созвездию (например, QAM), сначала преобразуются в вещественные символы

с использованием метода OQAM. Для повышения помехоустойчивости в канале с дисперсией применяется метод адаптивной модуляции с расширенным созвездием, позволяющий изменять размерность созвездия на отдельных поднесущих в зависимости от характеристик канала. Далее сигнал формируется с помощью банка синтезирующих фильтров. Математически непрерывный сигнал FBMC/OQAM может быть представлен во временной области в следующем виде (1), где центральным элементом, определяющим свойства сигнала, является импульсная характеристика формирующего фильтра $g(t)$.

$$s(t) = \sum_n \sum_{m=1}^{M-1} d_{m,n} g(t - n\Delta T) e^{j2\pi m\Delta F t} e^{j\phi_{m,n}}. \quad (1)$$

В данной работе импульсная характеристика формирующего фильтра выбирается как чётная вещественная функция, что обеспечивает симметрию и вещественность её частотной характеристики. Для параметризации и последующей оптимизации $g(t)$ представляется в виде конечного ряда косинусных функций (2), где коэффициенты ряда a_k выступают в качестве управляемых параметров, подлежащих определению.

$$g(t) = a_0 + 2 \sum_{k=1}^{m-1} a_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi k t}{T}\right). \quad (2)$$

Основная задача синтеза формулируется как задача условной оптимизации. В качестве целевого функционала выбирается мера внеполосных излучений сигнала [8]:

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\omega) |S(\omega)|^2 d\omega, \quad S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (3)$$

где $S(\omega)$ – спектр сигнала с огибающей $a(t)$, функция $g(\omega) = \omega^{2n}$ определяет поведение спектра внутри и вне занимаемой полосы частот. Для возможности численного решения бесконечномерная задача сводится к конечномерной путём параметризации $g(t)$ с использованием базиса чётных гармоник на интервале $[-T/2, T/2]$:

$$J = T \sum_{k=1}^m a_k^2 \left(\frac{\pi}{T} k\right)^{2n}. \quad (4)$$

Процесс оптимизации осложняется сложной, «овражной» структурой поверхности целевого функционала, требующей применения специальных численных методов, устойчивых к попаданию в локальные минимумы. Критерий оптимизации дополняется двумя важными ограничениями. Первое ограничение накладывает условие нормировки энергии $\varepsilon_{en} = 1$ импульсной характеристики:

$$\frac{T}{2} \left(\frac{a_0^2}{2} + \sum_{k \neq 0}^m (a_k)^2 \right) = \varepsilon_{en}. \quad (5)$$

Второе и наиболее критичное ограничение связано с минимизацией межсимвольной интерференции (ISI), вызванной дисперсией. Оно формулируется через ограничение уровня вторичных лепестков

автокорреляционной функции отфильтрованного импульса величиной ε_{ISI} .

$$\sum_{l \neq 0} \left| R_{hh} \left[l \cdot \frac{(L_a - 1)}{K \cdot 2} \right] \right|^2 \leq \varepsilon_{ISI}, \quad R_{hh}[\tau] = \sum_k a_k \cdot a_{k-\tau}, \quad (6)$$

где ε_{ISI} – пороговое значение допустимой интерференции, L_a – количество поднесущих, K – коэффициент перекрытия. Параметр ε_{ISI} играет ключевую роль, позволяя управлять компромиссом между степенью подавления внеполосных излучений (чем ниже внеполосное излучение, тем лучше) и устойчивостью к временному расплыванию импульсов (чем меньше допустимая ISI, тем устойчивее сигнал к дисперсии). На рис. 2 представлена визуализация карты межсимвольной и межканальной интерференции, наглядно иллюстрирующая влияние выбора ε_{ISI} . Вариант 1.б, полученный при жёстком ограничении на ISI, сохраняет чёткие границы между символами, что свидетельствует о минимальном уровне искажений. Вариант 1.в, соответствующий высокому допустимому уровню интерференции, демонстрирует сильное размытие и наложение символов.

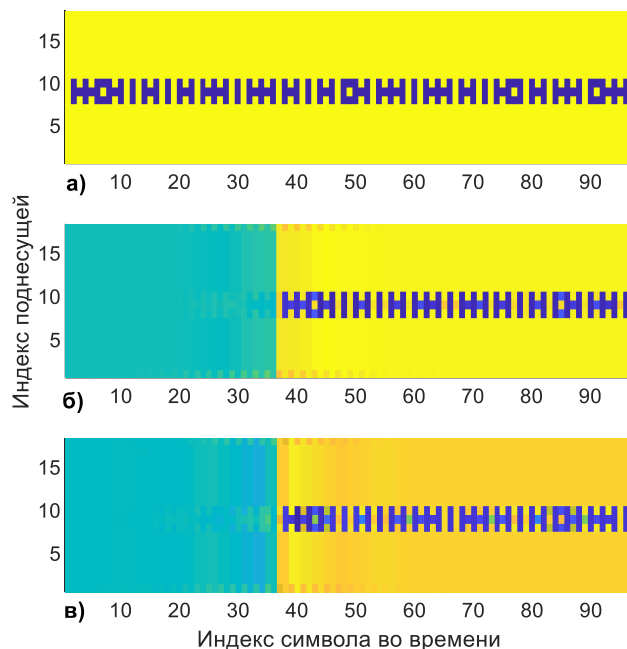


Рис. 2. Карта межсимвольной и межканальной интерференции в системе FBMC/OQAM: а) исходная последовательность; б) результат при низком пороге ε_{ISI} в) результат при высоком пороге ε_{ISI}

В результате решения сформулированной оптимизационной задачи определяется оптимальный набор коэффициентов a_k^{opt} . В табл. 1 приведён пример такого набора для синтезированного фильтра с перекрытием $K=13$ в сравнении с коэффициентами эталонного фильтра PHYDYAS ($K=8$).

ТАБЛИЦА I. СРАВНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СИНТЕЗИРОВАННОГО ФИЛЬТРА (13 КОЭФФИЦИЕНТОВ) И ФИЛЬТРА PHYDYAS (8 КОЭФФИЦИЕНТОВ)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1.0165	0.9811	1.0166	0.9744	0.9856	-0.009	-0.9875	-0.236	0.0868	-0.0452	0.0303	-0.017
1	0.9993	0.9820	0.8943	0.7071	0.4476	0.1887	0.0367					

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для всесторонней оценки предложенного метода синтеза была разработана детализированная имитационная модель в программной среде MATLAB. Моделирование проводилось для типичного сценария оптического IMDD-канала. Основные параметры модели: скорость передачи данных 20 Гбит/с, модуляция 16-QAM с адаптивным расширением созвездия, длина одномодового волокна 50 км с учётом влияния хроматической дисперсии, общее количество поднесущих 1024 (из них 180 используются для передачи информации), учёт шума интенсивности лазерного излучения (RIN) с уровнем -139 дБм. Сравнительный анализ проводился между системой с предложенным синтезированным оптимальным фильтром (параметры: перекрытие $K=13$, скорость спада спектра $n=3$) и системой с классическим формирующим фильтром PHYDYAS ($K=8$).

На рис. 3 показаны графики спектральной плотности мощности (СПМ) для трёх случаев: синтезированного фильтра, фильтра PHYDYAS и, для сравнения, классического OFDM-сигнала. Спектр сигнала с синтезированным фильтром имеет наиболее крутой спад за пределами основной полосы. Количественный анализ показал, что выигрыш в подавлении внеполосных излучений предложенного фильтра по сравнению с PHYDYAS составляет 11.8 дБ. При этом по сравнению с OFDM преимущество синтезированного фильтра в подавлении побочных излучений является подавляющим.

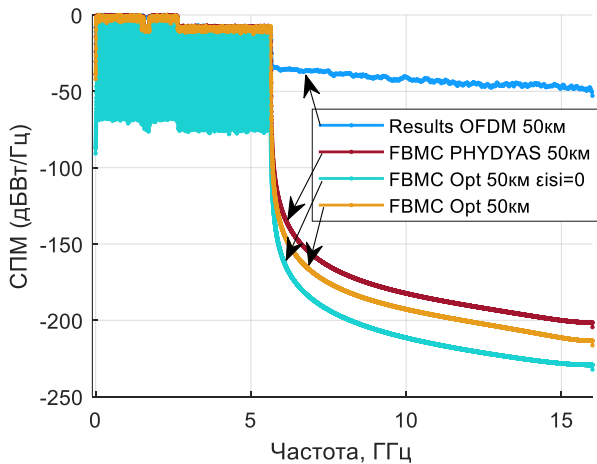


Рис. 3. Спектральная плотность мощности сигналов, полученная в результате имитационного моделирования

На рис. 4 представлены кривые зависимости коэффициента битовых ошибок (BER) от отношения сигнал-шум (ОСШ) для систем с синтезированным фильтром и с фильтром PHYDYAS. Полученные зависимости демонстрируют сопоставимую помехоустойчивость обеих систем, что является важным результатом. Это подтверждает, что в процессе оптимизации удалось достичь компромисса: значительное улучшение спектральных характеристик

(подавление излучений) не привело к ухудшению помехоустойчивости в дисперсионном канале. Небольшое различие в требуемом ОСШ указывает на возможность дальнейшей тонкой настройки ограничения на ISI для достижения ещё более сбалансированных характеристик.

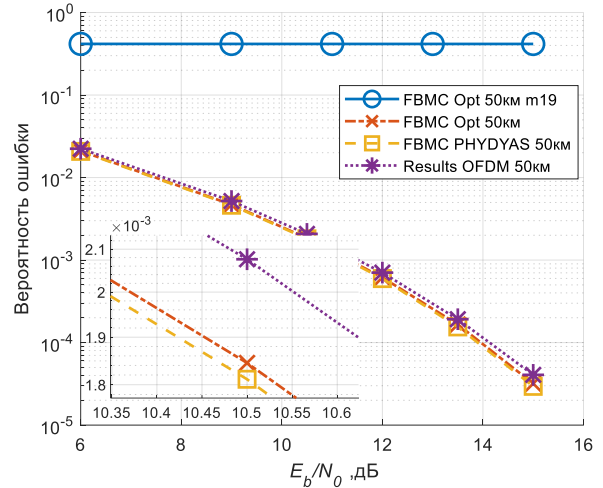


Рис. 4. Помехоустойчивость приёма, полученная в результате имитационного моделирования

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была успешно решена задача синтеза специализированного формирующего фильтра для систем FBMC/OQAM, ориентированных на применение в протяжённых оптических линиях с прямой модуляцией и прямым детектированием (IMDD), где существенное влияние оказывает хроматическая дисперсия. Разработанный метод параметрической численной оптимизации позволяет находить коэффициенты фильтра, обеспечивающие оптимальный баланс между двумя ключевыми требованиями: минимальным уровнем внеполосного излучения и максимальной устойчивостью к межсимвольной интерференции, порождаемой дисперсией. Таким образом, предлагается отказ от использования универсального фильтра (PHYDYAS) в пользу фильтра, синтезированного с учётом специфических условий конкретного дисперсионного канала.

Результаты комплексного численного моделирования подтвердили высокую эффективность предложенного подхода. Синтезированный фильтр продемонстрировал существенное превосходство в спектральной области, обеспечив на 11.8 дБ лучшее подавление внеполосных излучений по сравнению с эталонным фильтром PHYDYAS, при этом сохранив аналогичные показатели помехоустойчивости. Внедрение такого решения позволит повысить спектральную эффективность оптических IMDD-систем, увеличить максимальную дальность передачи и обеспечить возможность более плотного частотного плана в многоканальных конфигурациях (DWDM). Предложенный подход может служить основой для развития адаптивных алгоритмов

формирования сигналов в концепции программно-определяемых оптических сетей (SDON), где параметры передатчика могут динамически адаптироваться к изменяющимся условиям в канале связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Vaigandla K.K., Benita J. Study and analysis of multi carrier modulation techniques–FBMC and OFDM // *Materials Today: Proceedings*. 2022. Т. 58. С. 52-56.
- [2] Chekireva A., Ovsyannikova A., Zavjalov S. BER performance improvement in IMDD systems using FBMC signals // 2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). IEEE, 2024. С. 1-5.
- [3] Chen M. et al. Demonstration of a low-complexity real-time FBMC transmitter for a spectral-efficiency IMDD system // *Optics Letters*. 2024. Т. 49. №. 18. С. 5272-5275.
- [4] Варданян В.А. Имитационное моделирование процесса передачи OFDM сигналов по дисперсионному волоконно-оптическому тракту // *T-comm-Телекоммуникации и Транспорт*. 2017. Т. 11. №. 11. С. 18-24.
- [5] Biyu You, Liu Yang, Fengguang Luo et al. FBMC physical layer: a primer // *PHYDYAS*, January. 2010. V. 25, №. 4. P. 7–10
- [6] You B., Yang L., Luo F, Yang S., Chen D. Pilot-based extended Kalman filter for phase noise estimation in CO-FBMC/OQAM systems // *Optics Communications*. 2019. Т. 443. С. 116-122.
- [7] T. Nguyen, F. Rottenberg, S. Gorza, J. Louveaux, and F. Horlin. Efficient chromatic dispersion compensation and carrier phase tracking for optical fiber FBMC/OQAM systems // *Journal of Lightwave Technology*. 2017. Т. 35. №. 14. С. 2909-2916.
- [8] Макаров С.Б., Завьялов С.В., Овсянникова А.С. Спектральная и энергетическая эффективность оптимальных АФМ сигналов с увеличенными размерами сигнального созвездия // *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2022. № 2. С. 30-43.