

БАНКИ ФИЛЬТРОВ И OFDM В СИСТЕМАХ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СО МНОГИМИ НЕСУЩИМИ

Витязев В.В., заведующий кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники Рязанского государственного радиотехнического университета, д.т.н., профессор, e-mail: vityazev.v.v@rsreu.ru;

Никушкин П.Б., магистрант Рязанского государственного радиотехнического университета.

FILTER BANKS AND OFDM IN BROADBAND DATA TRANSMISSION MULTICARRIER SYSTEMS

Vityazev V.V., Nikishkin P.B.

The methods of constructing broadband data transmission multicarrier system are considered. The way of adaptive broadband data transmission based on a combined approach is proposed. This way combines filter banks technology and OFDM. The spectral and energy efficiency system is shown in conditions of frequency fading, noise reduction and Doppler shifts.

Key words: filter banks, OFDM, data transmission, broadband, combine approach, spectral efficiency, adaptation, noise reduction.

Ключевые слова: банки фильтров, OFDM, передача данных, широкополосная, комбинированный способ, спектральная эффективность, адаптация, борьба с помехами.

Введение

Исторически первой областью применения методов анализа/синтеза сигналов на основе банка (набора) цифровых полосовых фильтров (ЦПФ) в системах телекоммуникаций является построение трансмультиплексоров – устройств преобразования вида уплотнения каналов: ВРК в ЧРК (временного в частотное разделение, на передающей стороне) и ЧРК в ВРК (частотного во временное разделение, на приемной стороне) [1, 2]. Последующее развитие теории многоскоростной обработки сигналов применительно к реализации систем анализа/синтеза сигналов на основе банков фильтров [3-6] нашло широкое отражение в работах, посвященных кодированию речи, звука и изображения.

Новым этапом на пути развития теории и применения банков ЦПФ стали широкополосные системы передачи данных со многими несущими, как альтернатива в ряде приложений технологии OFDM [7-9].

Известны [8] неоспоримые преимущества OFDM в системах высокоскоростной беспроводной передачи данных:

- значительное увеличение длительности символов (по отношению к методам модуляции с одной несущей), позволяющее вести эффективную борьбу с межсимвольной интерференцией (МСИ);
- простая генерация передаваемого сигнала с использованием обратного БПФ и не менее простое разделение принимаемого сигнала с применением прямого БПФ;
- высокая спектральная эффективность, как результат адаптивной модуляции на поднесущих;

Рассматриваются методы построения системы широкополосной передачи данных со многими несущими. Предлагается способ адаптивной широкополосной передачи данных на основе комбинированного подхода, сочетающий технологии банка фильтров и OFDM. Показана возможность повышения спектральной и вычислительной эффективности системы высокоскоростной передачи данных на основе предложенного способа в условиях частотных замираний, подавления сосредоточенными по спектру помехами и доплеровских смещений.

– существенное упрощение реализации адаптивного эквалайзера;

– эффективное сочетание технологий OFDM и MIMO.

Вместе с тем, как отмечено в работе [8], в некоторых областях, таких как когнитивное радио, системы беспроводной передачи с многопользовательским доступом на линии «мобильный абонент – базовая станция», технология OFDM трудно реализуема из-за проблемы синхронизации.

Повышенный интерес к использованию банков фильтров для систем передачи данных со многими несущими – FBMC (Filter Bank Multicarrier), был связан с поиском путей компенсации потерь спектральной эффективности и обеспечения работоспособности системы передачи данных со многими несущими в условиях частотно-временного рассеивания в многолучевых каналах связи, подверженных замираниям, доплеровскому смещению и расширению частот. Борьба с межсимвольной (МСИ) и межканальной интерференцией (МКИ) в условиях частотно-временного рассеивания – основная проблема на пути дальнейшего повышения эффективности широкополосной передачи данных со многими несущими.

Известен целый ряд подходов к решению этой проблемы как в рамках технологии OFDM, так и с применением банков фильтров, технологии FBMC [10]. В системах связи, использующих OFDM, для борьбы с МСИ применяют циклический префикс (защитный интервал), что приводит к потере спектральной эффективности. Но

главная проблема технологии OFDM – это МКИ, обусловленная частотным рассеиванием, высокая чувствительность к доплеровским смещениям и расширениям, неминуемо приводящим к потере ортогональности частотных каналов и, как следствие, срывам синхронизации [8, 10]. Введение защитных интервалов в виде «нулевых» поднесущих и спектральных окон не решает проблему в достаточной степени и приводит к потере спектральной эффективности. Одним из возможных походов к решению проблемы уменьшения МКИ и МСИ является использование хорошо локализованных в частотно-временной области сигнальных базисов, в частности базиса Вейля Гейзенберга [11].

Вместе с тем, неконтролируемое доплеровское смещение частот и в этом случае приводит к срывам синхронизации.

Таким образом, проблема повышения спектральной эффективности и работоспособности систем широкополосной передачи данных в многолучевых дисперсионных каналах связи с использованием технологии OFDM и банков фильтров по-прежнему остается актуальной. В настоящей работе предпринимается попытка объединения двух технологий в рамках двухступенчатой и, в более общем случае, многоступенчатой реализации. Предполагается, что весь диапазон рабочих частот широкополосного канала связи предварительно разбивается на отдельные поддиапазоны и внутри каждого поддиапазона частот формируется OFDM сигнал с последующим объединением всех частотных составляющих в общий групповой OFDM с ЧПК. Рассматриваются достоинства и недостатки данного подхода с позиции спектральной эффективности, работоспособности в

условиях частотных замираний и доплеровских искажений, а также вычислительных затрат.

Системы широкополосной передачи данных со многими несущими на основе банков фильтров и OFDM

На рис. 1 представлена классическая схема синтезатора группового широкополосного сигнала на основе банка цифровых полосовых фильтров-интерполяторов, реализующая одновременную передачу данных по N частотным каналам на несущих частотах $\omega_i, i = \overline{1, N}$, где N – приведенная круговая частота. Предполагается, что предварительно высокоскоростной поток данных $x(nT_1)$ преобразуется в N параллельных последовательностей с понижением частоты дискретизации в N раз. Частота дискретизации каждой последовательности увеличивается экспандером в K раз ($K \geq N$) путем расстановки $K-1$ нулей между каждой парой соседних отсчетов. Низкочастотный фильтр с частотной характеристикой $H_0(\omega)$ интерполирует промежуточные отсчеты до частоты дискретизации группового сигнала, равной $2\pi K / N$, а умножитель $e^{j\omega_i m}, i = \overline{1, N}$, на выходе каждого низкочастотного фильтра-интерполятора трансформирует спектр выходного сигнала в окрестность i -ой несущей частоты ω_i . Параллельно-последовательный преобразователь формирует групповой широкополосный сигнал, суммируя выходы всех частотных каналов.

На приемной стороне реализуется дуальный процесс – преобразование принятого группового сигнала с ЧПК в N последовательностей с ВПК и понижением частоты дискретизации на выходе каждого канала в K раз. Па-

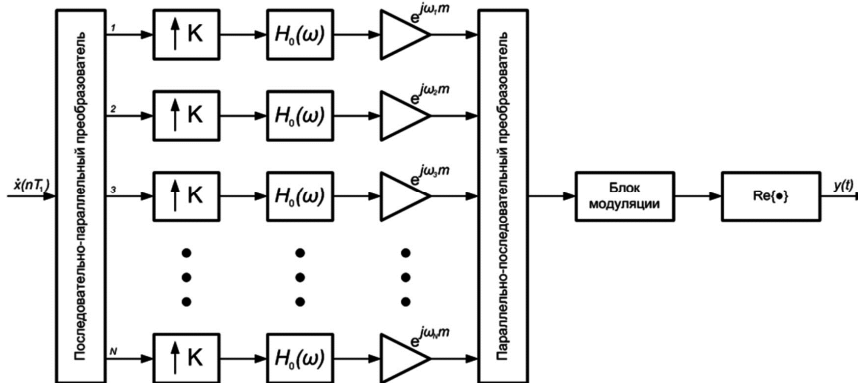


Рис. 1. Структурная схема синтезатора группового широкополосного сигнала на основе банка цифровых фильтров

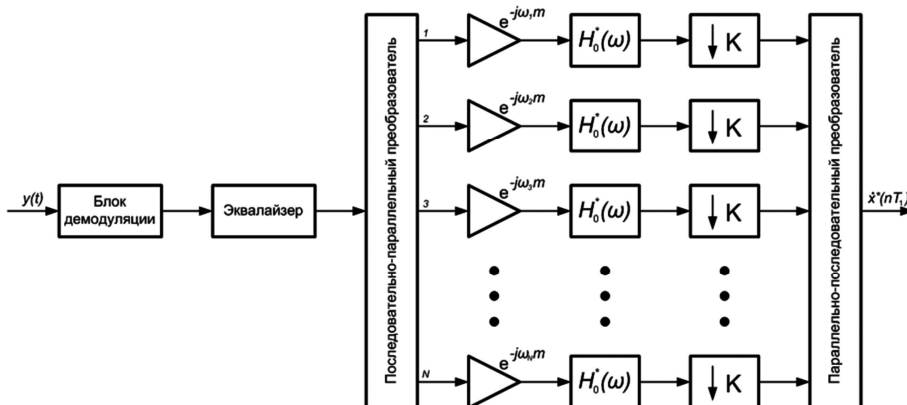


Рис. 2. Структурная схема анализатора группового широкополосного сигнала на основе банка цифровых фильтров

раллельно-последовательный преобразователь формирует высокоскоростной поток данных $x^*(nT_1)$, коммутируя выходы всех частотных каналов в один общий поток. Для борьбы с линейными амплитудно-частотными искажениями, вносимыми каналом связи, в общую цепь преобразования на приемной стороне включается адаптивный эквалайзер.

Основным элементом данной структуры является полосовой фильтр-интерполятор (на передающей стороне) и полосовой фильтр-дециматор (на приемной стороне). От частотной избирательности (формы спектрального окна), определяемой порядком фильтра интерполятора (дециматора), зависит уровень МКИ и устойчивость работы в условиях доплеровского смещения несущих частот. Увеличение порядка КИХ-фильтров приводит к значительному увеличению вычислительных затрат и памяти данных.

Однако рассматриваемый способ построения набора фильтров-интерполяторов (дециматоров) по прямой параллельной форме реализации, когда каждый фильтр реализуется независимо от других фильтров, является далеко не лучшим решением проблемы с позиции минимизации приведенных вычислительных затрат. Опираясь на теорию многоскоростной обработки сигналов, были разработаны многочисленные методы и алгоритмы построения банков цифровых фильтров частотной селекции [3-5], сравнительный анализ эффективности которых применительно к задаче построения системы передачи со многими несущими был рассмотрен в [10].

Вместе с тем, в условиях отсутствия заметных доплеровских искажений и глубоких замираний в канале связи, наилучшее решение проблемы высокоскоростной передачи данных со многими несущими с позиции спек-

тральной эффективности и минимума вычислительных затрат, как известно, дает OFDM, которую можно рассматривать как частный случай построения банка фильтров с прямоугольным окном импульсной характеристики длительностью NT_1 ($K = N$) и частотной характеристикой вида

$$\frac{\sin(N\omega/2)}{N \sin(\omega/2)}$$

При этом, если число частотных каналов N кратно степени двойки, то многократное уменьшение вычислительных затрат дает применение алгоритма ОБПФ на передающей стороне и алгоритма БПФ на приемной стороне (рис. 3).

Несмотря на простоту реализации и широкий спектр применения технологии OFDM, отмеченные выше недостатки этого популярного вида модуляции, требует проведения дальнейших исследований эффективности работы систем высокоскоростной передачи данных на основе банков фильтров и OFDM.

В первую очередь, это касается работы в условиях глубоких замираний, защиты от мощных сосредоточенных по спектру помех и доплеровских искажений. Одним из возможных подходов к решению поставленной задачи является сочетание достоинств и возможностей банков фильтров и OFDM.

Способ адаптивной широкополосной передачи данных со многими несущими

Предлагается комбинированный подход, предполагающий разбиение всего диапазона рабочих частот широкополосного группового сигнала на M поддиапазонов и реализацию внутри каждого поддиапазона более коротких OFDM сигналов ($OFDM_i, i = 1, M$).

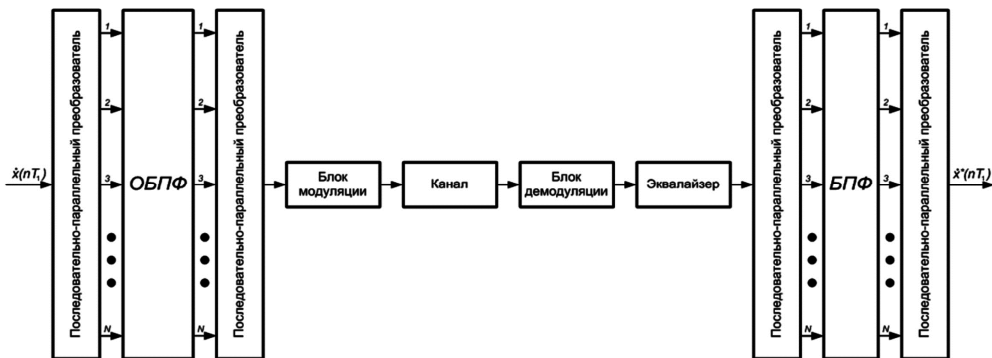


Рис. 3. Общая схема построения системы передачи данных с применением OFDM

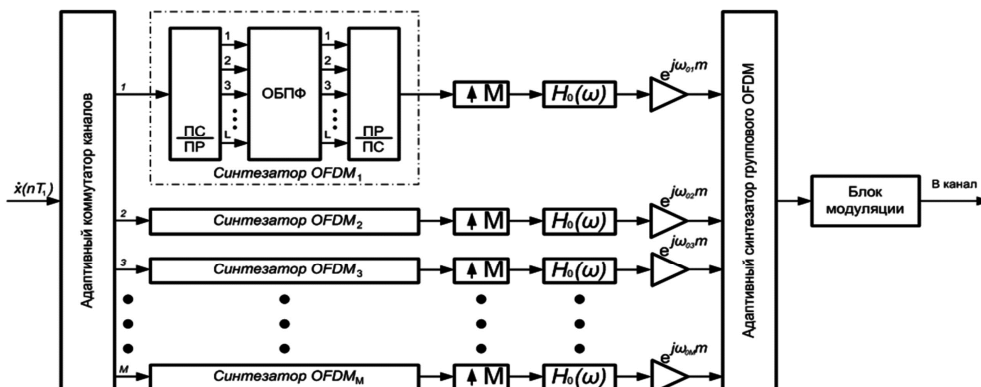


Рис. 4. Структурная схема синтезатора группового широкополосного OFDM сигнала

На рис. 4 представлена структурная схема синтезатора группового широкополосного OFDM сигнала. Высокоскоростной поток данных $x(nT_1)$ распределяется адаптивным коммутатором каналов на M частотных поддиапазонов с понижением частоты дискретизации (скорости потоков) в M раз. В каждом частотном поддиапазоне формируется i -ый OFDM сигнал, $i = \overline{1, M}$ по классической структуре с применением L -точечного ОБПФ. Далее частота дискретизации каждого $OFDM_i$ повышается экспандером частоты дискретизации в M раз, низкочастотный фильтр с функцией передачи (частотной характеристикой) $H_0(\omega)$ интерполирует промежуточные данные, а умножитель на комплексную функцию $e^{j\omega_0 m}$, $i = \overline{1, M}$ «транслирует» сигнал $OFDM_i$ в окрестность центральной частоты ω_{0i} (как по классической схеме трансмультиплексора). Адаптивный синтезатор группового OFDM формирует широкополосный групповой OFDM сигнал, суммируя выходы всех задействованных частотных каналов.

На приемной стороне реализуется дуальный процесс – преобразование принятого группового сигнала OFDM с ЧРК в M временных последовательностей с понижением частоты дискретизации в M раз на выходе каждого частотного канала. Эквалайзер, работающий на пониженной в M раз частоте дискретизации выравнивает ту часть частотной характеристики канала связи, которая соответствует i -му поддиапазону частот. Анализатор OFDM по схеме, дуальной синтезатору OFDM, формирует последовательность выходных данных по каждому частотному каналу. Адаптивный коммутатор каналов формирует общий высокоскоростной поток $x^*(nT_1)$, совпадающий с передаваемым потоком $x(nT_1)$ в пределах заданной точности.

Идея построения адаптивной системы заключается в том, что по результатам предварительного тестирования канала связи и определения зон затухания и подавления, можно управлять скоростью передачи данных, уменьшая или увеличивая ее в зависимости от числа пораженных частотных каналов. Предполагается, что в процесс формирования группового широкополосного OFDM сигнала

включаются только те частотные каналы, которые обеспечат устойчивую приемо-передачу i -го OFDM сигнала. Необходимо также отметить, что в рамках данной структуры проще обеспечить ортогональность более коротких OFDM сигналов, а адаптивный эквалайзер, имеющий существенно меньший порядок и работающий на пониженной частоте дискретизации, более эффективно решает задачу выравнивания частотных характеристик в каждом отдельном поддиапазоне частот.

Синтез оптимальной структуры системы широкополосной передачи данных со многими несущими по критерию минимума вычислительных затрат при заданном значении спектральной эффективности прежде всего ставит вопрос о минимизации затрат на реализацию банка цифровых фильтров. При увеличении требований к спектральной эффективности растет число частотных каналов, позволяя более точно локализовать зоны глубоких замираний и подавления сосредоточенными по спектру помехами. С увеличением числа частотных каналов вычислительные затраты могут расти по квадратичной зависимости, так как пропорционально числу каналов растет порядок КИХ-фильтров, используемых для интерполяции и децимации в структуре синтезатора и анализатора группового широкополосного OFDM сигнала. В этой связи целесообразно проведение сравнительного анализа вычислительной эффективности трех основных подходов к построению банка полосовых фильтров [4]: пирамидальной многоступенчатой структуры, полифазной формы с применением ДПФ, прямой параллельной формы на основе алгоритма быстрой свертки, применительно к системе широкополосной передачи со многими несущими. Нельзя не учитывать и влияние собственных шумов децимации, обусловленных «элайзингом» («заворачиванием» боковых лепестков спектра выходного сигнала в область частот OFDM сигнала) [12]. Поэтому альтернативный подход к построению банка фильтров может базироваться на применение цифровых гребенчатых фильтров [4]. В работе [13] предложен метод построения системы сбора и передачи данных с ЧРК на основе пирамидальной структуры цифровых гребенчатых фильтров, отличающийся высокой вычислительной эффективностью и отсутствием шума децимации.

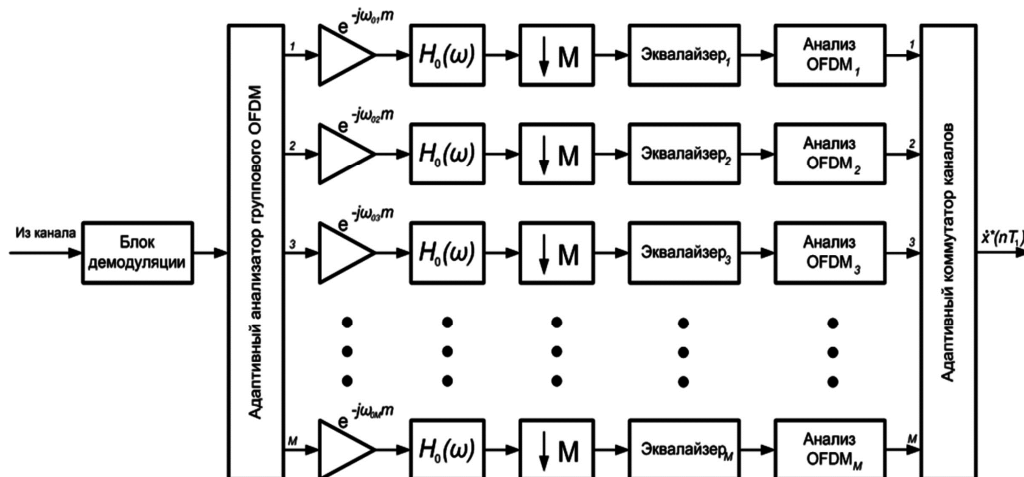
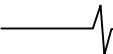


Рис. 5. Структурная схема анализатора группового широкополосного OFDM сигнала



Заключение

Отмечено, что в ряде приложений применение технологии FBMC (банков фильтров со многими несущими) и реализация системы широкополосной передачи данных со многими несущими на ее основе дает лучшее решение с позиции спектральной и энергетической эффективности.

Предложен способ адаптивной широкополосной передачи данных со многими несущими на основе комбинированного подхода, сочетающего технологии банка фильтров и OFDM. Банк из M полосовых фильтров берет на себя задачу разбиения всего диапазона рабочих частот на M поддиапазонов с последующим формированием OFDM сигнала внутри каждого частотного канала. Групповой широкополосный OFDM сигнал формируется адаптивным синтезатором на передающей стороне и разделяется на M частотных каналов с последующим формированием высокоскоростного потока данных адаптивным коммутатором каналов.

Показаны возможности предложенного способа по повышению спектральной эффективности в условиях частотных замираний и доплеровских смещений, а также подавления сосредоточенными по спектру помехами.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в Рязанском государственном радиотехническом университете (проект №14-19-01263).

Литература

1. Витязев В.В. Цифровая обработка сигналов: ретроспектива и современное состояние // Электросвязь. – 1997. – № 6.

2. Шойерманн Х., Геклер Х. Систематизированный обзор цифровых методов преобразования вида уплотнения каналов // ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 11. С. 52–84.

3. Crochiere R.E., Rabiner L. Multirate Digital Signal Processing. Prentice Hall. Englewood Cliffs. – NJ, 1983.

4. Витязев В.В. Цифровая частотная селекция сигналов. М.: Радио и связь, 1993. 240 с.

5. Vaidyanathan P.P. Multirate Systems and Filter Banks. Prentice Hall. Englewood Cliffs. – NJ, 1993.

6. Mitra S.K. Digital Signal Processing: a computer-based approach. McGraw-Hill. Comp. Inc., 1998.

7. Farhang-Boroujenu B. Signal Processing Techniques for Software Radios// Lulu publishing house, 2010.

8. Behrouz Farhang-Boroujenu. OFDM Versus Filter Bank Multicarrier // IEEE Signal Processing Magazine, -2011, -Vol. 28, № 3, – P. 92-112.

9. Lin L. and Farhang-Boroujenu B. Cosine modulated multitone modulation for very high-speed digital subscriber lines // EURASIP J. Appl. Signal Processing, – 2006, Article ID 19329.

10. Овинников А.А. Методы анализа/синтеза сигналов в системах беспроводной связи со многими несущими // Электросвязь. 2013. № 9. – с. 28-32.

11. Волчков В.П. Новые технологии передачи и обработки информации на основе хорошо локализованных сигнальных базисов // Научные ведомости. 2009. № 15. – с. 181-189.

12. Витязев В.В., Горюшкин Р.С. Анализ шумов квантования многоскоростных структур узкополосных КИХ-фильтров // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 4.

13. Витязев В.В., Никишкин П.Б. // Метод анализа/синтеза сигналов в системах передачи данных с частотным уплотнением каналов // Электросвязь. 2014. № 12. – с. 4-9.