

УДК 621.391

МЕТОДЫ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ СИГНАЛОВ С ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

Никишкин П.Б., н.с. кафедры ТОР РГРТУ, e-mail: tor@rsreu.ru;

Витязев В.В., д.т.н., заведующий кафедрой ТОР РГРТУ e-mail: vityazev.v.v@rsreu.ru.

BROADBAND DATA TRANSMISSION METHODS BASED ON SIGNALS WITH FREQUENCY-DIVISION MULTIPLEXING

Nikishkin P.B., Vityazev V.V.

Methods of broadband data transmission with frequency division multiplexing are considered. A method for adaptive broadband data transmission based on filter bank and OFDM technologies is presented. The possibility of increasing the spectral and computational efficiency of the data transmission system is shown. The results of studying the Doppler shifts using OFDM technology are generalized.

Key words: broadband data transmission systems, ofdm, filter bank.

Ключевые слова: Широкополосные системы передачи данных, технология OFDM, банк фильтров.

Введение

В современных стандартах беспроводной связи используются методы передачи информации на основе сигналов со многими несущими.

С развитием аппаратных платформ стал возможным быстрый расчёт дискретного преобразования Фурье, в результате чего мультиплексирование сигналов с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) стало широко использоваться [1, 2].

К основным преимуществам технологии OFDM можно отнести:

- увеличение длительности символов (по отношению к методам модуляции с одной несущей), в результате чего появилась возможность противостоять межсимвольной интерференции;
- при использовании дискретного преобразования Фурье генерация OFDM сигнала вычислительно простая операция;
- высокая спектральная эффективность;
- простая реализация эквалайзера;
- эффективное сочетание OFDM и MIMO [4, 9].

Для повышения эффективности в широкополосных системах со многими несущими возникают проблемы с

Рассматриваются методы широкополосной передачи данных с частотным разделением каналов. Представлен способ адаптивной широкополосной передачи данных на основе технологий банка фильтров и OFDM. Показана возможность повышения спектральной и вычислительной эффективности системы передачи данных. Обобщены результаты исследования доплеровских смещений на технологию OFDM.

межсимвольной и межканальной интерференцией. Известен целый ряд подходов для борьбы с данными проблемами. В системах связи с технологией OFDM, для борьбы с межсимвольной интерференцией, используют защитный интервал, однако это приводит к потере спектральной эффективности. Одна из главных проблем OFDM – это межканальная интерференция, обусловленная частотным рассеиванием и расширением, что приводит к потере ортогональности частотных каналов и появлению ошибок [3].

В варианте реализации технологии OFDM с использованием преобразования Фурье (рис. 1) вычислительные затраты можно многократно уменьшить, если количество частотных каналов кратно степени двойки.

Несмотря на простоту реализации и широкий спектр применения технологии OFDM, отмеченные выше недостатки этого популярного вида модуляции, требуют проведения дальнейших исследований эффективности работы систем высокоскоростной передачи данных [4].

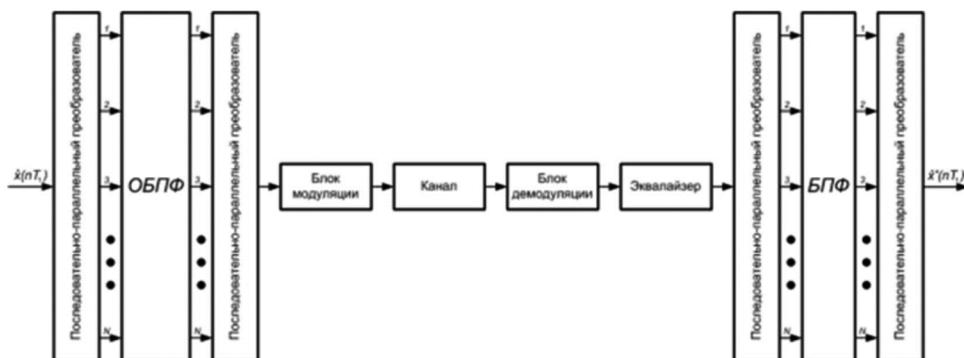
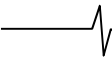


Рис. 1. Классическая схема системы передачи данных с OFDM



С другой стороны, применение технологии OFDM в таких областях как когнитивное радио, системах беспроводной передачи с многопользовательским доступом на линии «мобильный абонент – базовая станция» трудно реализуема из-за проблем с синхронизацией [5].

В этих и других приложениях применение технологии банка фильтров со многими несущими (FBMC – Filter Banks Multi-Carrier) предоставляет оптимальное решение с позиции спектральной и энергетической эффективности.

Технологии на основе банка фильтров

Упрощенная структура приемо-передатчика сигналов со многими несущими на основе банка фильтров представлена на рис. 2. Предполагается, что двоичный поток преобразуется в M параллельных частотных каналов $x_k(t)$, каждый из которых обрабатывается формирующим фильтром (ФНЧ с импульсной характеристикой $h(t)$) и переносится на несущую частоту, соответствующую k -му каналу [10].

Скорость параллельного цифрового потока в каждом канале уменьшается в M раз по сравнению с последовательным потоком. В результате при общей неизменной битовой скорости и неизменной занимаемой полосе частот в сигнале со многими несущими длительность импульсов в каждом канале увеличивается в M раз. В отличие от OFDM для FBMC нет необходимости использовать защитный интервал, поэтому длительность сигнала является минимально возможной [10].

Технология FBMC при наличии ограничений сигнала во временной и частотной области, обычно требует наличия большой длины ИХ фильтра (например, более

чем в 3 раза превышает длительность символа). Таким образом, требуются большие вычислительные ресурсы и память данных. Более того, технология FBMC подразумевает использование более массивной антенны для передачи сигналов, по сравнению с другими технологиями, что в свою очередь нежелательно для стандартов беспроводной связи будущих поколений [12]. Таким образом, этот недостаток ограничивает применение технологии FBMC.

Рассматриваемые выше технологии являются перспективными в своих областях применения, однако проблемы, связанные со спектральной эффективностью, остаются по-прежнему актуальными.

В результате чего был предложен метод субполосного формирования широкополосного сигнала на основе технологий OFDM и банка фильтров [4, 11].

Субполосная OFDM

В этом методе предполагается, что доступный частотный диапазон разбивается на субполосы и внутри каждой субполосы формируется OFDM сигнал. Групповой сигнал получается объединением всех выходов, формируемых частотными каналами (см. рис. 3).

В статье [11] рассматриваются вопросы использования соседних частотных каналов с достаточно низкой межканальной интерференцией.

Преимущество данной технологии состоит в том, что нет необходимости в синхронизации, в то время как для используемых в настоящий момент технологий необходима точная синхронизация, применение которой не предполагается в будущих радиоинтерфейсах. Одной из таких технологий, не использующих систему синхро-

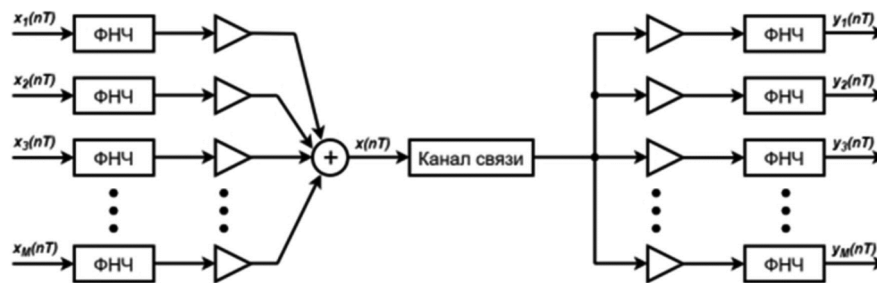


Рис. 2. Общая схема построения банка фильтров

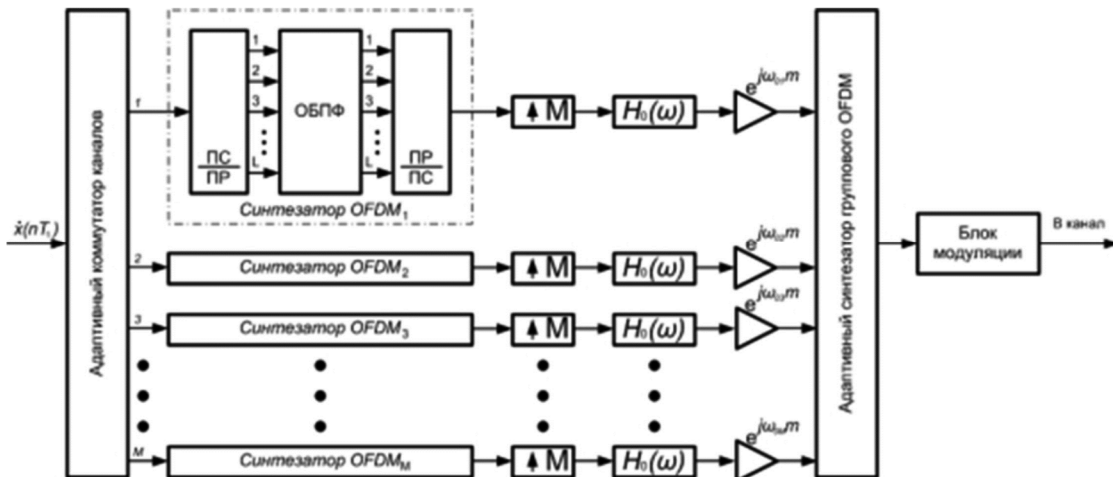


Рис. 3. Структурная схема синтезатора группового широкополосного OFDM сигнала

Таблица 1. Сравнение технологий OFDM, FBMC, GFDM, UFMC, F-OFDM и RB-F-OFDM

	OFDM	FBMC	GFDM	UFMC	RB-F-OFDM
Использование защитного интервала	+	-	-	-	-
Сложность построения фильтра	-	высокая	высокая	простая	простая
Режим модуляции	без ограничений	OQAM	без ограничений	без ограничений	без ограничений
Способность противостоять межсимвольной интерференции	низкая	высокая	высокая	высокая	высокая
Гибкость использования спектра	-	-	-	-	+

низации, является когнитивное радио. Как уже отмечалось ранее, технология FBMC может быть использована как альтернатива классическому OFDM, однако возникают проблемы, связанные со сложной реализацией эквалайзера. К достоинствам субполосного OFDM (SUB-OFDM, RB-F-OFDM – Resource-block filtered orthogonal frequency-division multiplexing) можно отнести обратную совместимость с существующими системами. Таким образом, приемник субполосного OFDM может принимать сигналы систем передачи информации на основе OFDM. При реализации субполосного OFDM можно эффективно использовать методы уменьшения пик-фактора, для повышения энергетической эффективности системы [11].

В статье [12] оценивается производительность таких технологий как FBMC, UFMC (Universal Filtered Multi-Carrier), GFDM (Generalized Frequency-Division Multiplexing), RB-F-OFDM. Можно отметить, что системы FBMC и GFDM являются более перспективными технологиями, однако использование данных технологий требует существенной доработки существующих систем, а работа по коротким сигналам нерациональна из-за низкой частотной-временной эффективности. У системы субполосного OFDM легкая обратная совместимость, поэтому развитие и исследование данной технологии остается актуальной.

Использование всех этих технологий подразумевает уменьшение внеполосного излучения и упрощение системы синхронизации. Стоит отметить, что в современных методах формирования широкополосных сигналов применяется фильтрация с различной методологией проектирования и эффективностью. Более подробное сравнение приведено в табл. 1.

В технологии GFDM можно отметить, что поднесущие расположены достаточно близко друг к другу, из-за чего нет взаимной ортогональности. Чтобы устранить межсимвольную интерференцию необходимо применение фильтров высокого порядка и добавление нулевых отсчетов. Кроме того, требуется предварительное подавление помех для ослабления их действия между поднесущими, которые могут появляться после фильтрации [12].

Технология UFMC использует длину импульсной характеристики фильтра, равную длительности защитного интервала в системе OFDM. Это позволяет уменьшать межсимвольную интерференцию, но уровень внеполосного излучения может быть неудовлетворительным. В отличие от этого, используя длину импульсной характеристики фильтра до половины длительности символа,

f-OFDM намеренно отказывается от ортогональности между последовательными символами OFDM в обмен на более низкий уровень внеполосного излучения и, таким образом, позволяет использовать минимальное количество защитных интервалов. При правильно спроектированных фильтрах (например, с ограниченным разбросом энергии) ухудшение рабочих характеристик в результате увеличения длины фильтра почти незначительно по сравнению с экономией на потреблении защитной полосы.

Технология RB-F-OFDM сочетает в себе все достоинства технологии f-OFDM и позволяет динамически подстраиваться под изменения в канале связи. Затраты на динамическое изменение фильтров превышают показатель для f-OFDM, однако их можно минимизировать при использовании частотных диапазонов одинаковой длительности.

В целом технология RB-F-OFDM выглядит как наиболее многообещающий претендент на базовый сигнал для 5G, обеспечивая известные преимущества OFDM:

- гибкое частотное мультиплексирование;
- простое выравнивание каналов;
- простая комбинация с многоантенной передачей, но и новые достоинства;
- услуги, адаптированные к различным потребностям;
- эффективное использование спектра;
- низкое значение внеполосного излучения;
- доступная вычислительная сложность;
- возможность включения сигналов других форм;
- обратная и прямая совместимость.

В статьях [11, 12] технология субполосного OFDM (RB-F-OFDM) рассматривается с точки зрения спектральной эффективности и вычислительных затрат, проводятся исследования работы в условиях канала с белым шумом, но при этом не учитывается работа в условиях воздействия эффекта Доплера.

В статье [7] проведено исследование работы технологии в канале с доплеровскими искажениями. Если обобщить результаты, приведённые в статьях [7, 8], то можно сделать вывод, что доплеровские искажения приводят к повороту сигнально-кодowego созвездия на некоторый угол (см. рис. 4) и значительных искажений в принимаемый сигнал не вносят.

Расстройка временной синхронизации приводит к вращению точек на сигнально-кодowym созвездии (см. рис. 5). Такое движение точек можно объяснить изменением частоты дискретизации и получением амплитуд

точек в моменты времени, не соответствующие максимальному значению.

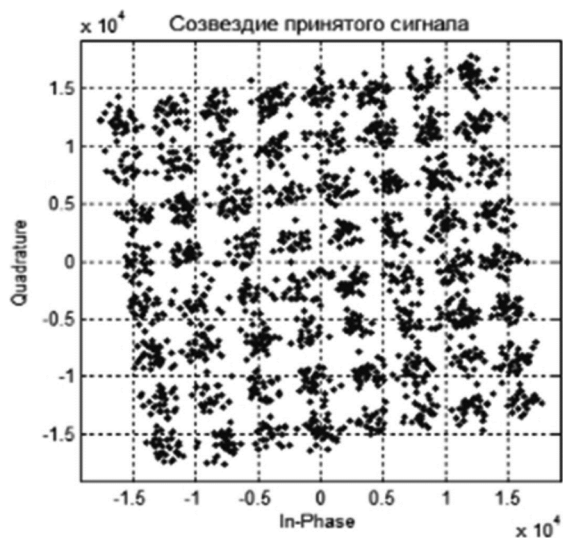


Рис. 4. Сигнально-кодовое созвездие принятого сигнала при наличии доплеровского сдвига в 200 Гц

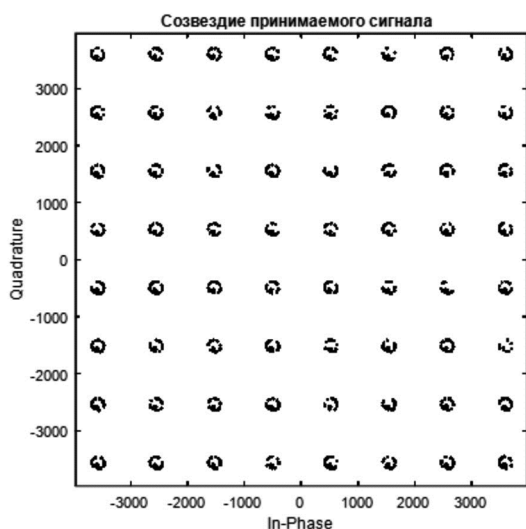


Рис. 5. Сигнально-кодовое созвездие принятого сигнала при наличии расстройки временной синхронизации



Рис. 6. Сигнально-кодовое созвездие принятого сигнала при наличии многолучевости

Как показали исследования, многолучевость одинаково влияет на работу технологий OFDM и SUB-OFDM. При условии наличия многолучевости выигрыш при использовании технологии SUB-OFDM получить сложно.

Из представленных рисунков выше можно сделать выводы, что технология SUB-OFDM работает так же, как и технология OFDM при моделировании простых различных мешающих воздействий. Требуется дальнейшее исследование работоспособности и эффективности технологии при более сложных мешающих воздействиях. Применение технологии SUB-OFDM позволяет в значительной степени подавить внеполосное излучение, межканальные интерференции и повысить эффективность передачи данных, за счет значительного уменьшения защитного интервала. Применение данной технологии позволяет в разрабатываемой системе гибко использовать частотный ресурс. Благодаря набору цифровых полосовых фильтров возможна передача в несмежных субполосах.

Дальнейшие исследования эффективности технологии субполосного OFDM следует проводить на таких искажениях и рассогласованиях в системах с OFDM как, фазовый шум несущей, разбалансировка квадратурных составляющих, и проблемы, вызываемые пик-фактором.

Статья подготовлена при поддержке НИИ «Фотон», Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина.

Заключение

Произведён обзор известных технологий, используемых для передачи данных со многими несущими. Обобщена информация исследования технологии субполосного OFDM в условиях работы с доплеровскими эффектами. Использование данной технологии позволяет значительно уменьшить использование защитного интервала, и тем самым повысить спектральную эффективность. При применении в системах передачи данных наблюдается уменьшение затрат на реализацию эквалайзера и систем синхронизации. Предполагается, что данную технологию нужно использовать в разрабатываемых в настоящее время стандартах беспроводной связи нового поколения (например, 5G), так как в них требуется обеспечение более высокой скорости передачи данных и эффективного использования частотного ресурса. Технология субполосного OFDM обратно совместима с классическим OFDM, поэтому приемником субполосных OFDM сигналов можно принимать и демодулировать сигналы текущих беспроводных стандартов связи. Внедрение субполосного OFDM в текущие стандарты связи требует модернизации только передатчика и приемника OFDM сигналов, в результате будет наблюдаться увеличение скорость передачи данных. Определён путь дальнейших исследований перспективного метода субполосной передачи данных.

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. Behrouz Farhang-Boroujeny. OFDM Versus Filter Bank Multicarrier // IEEE Signal Processing Magazine, 2011, vol. 28, no. 3, – pp. 92-112.

4. Витязев В.В., Никишкин П.Б. Банки фильтров и OFDM в системах широкополосной передачи данных со многими несущими. // Научно-технический журнал «ЦОС». 2015. – №4. – С. 30-34.

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

6. Витязев В.В., Никишкин П.Б. Исследование эффектов Доплера на OFDM и SUB-OFDM сигналы // 1-я Всероссийская конференция «Современные технологии обработки сигналов», Москва, Россия, доклады конференции.

7. Витязев В.В., Никишкин П.Б. Сравнение эффективности технологий OFDM и SUB-OFDM при различных мешающих воздействиях в канале связи. // 21-я Между-

народная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2019», Москва, Россия, доклады. 2019. – Книга 1. – С. 6-10.

8. Майков Д.Ю., Вершинин А.С. Влияние эффектов Доплера на OFDM сигнал // Молодой ученый. – 2014. – №21. – С. 175-179. – URL <https://moluch.ru/archive/80/14271/> (дата обращения: 18.11.2019).

9. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM: Учебное пособие для вузов / М.: Горячая линия-Телеком, 2017. – 352 с. – ISBN 978-5-9912-0549-8

10. Витязев В.В., Овинников А.А. Методы анализа/синтеза сигналов в системах беспроводной связи со многими несущими // ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ. 2013. № 9. С. 28-32.

11. Jialing Li and Erdem Bala and Rui Yang – Resource block Filtered-OFDM for future spectrally agile and power efficient systems. Physical Communication, 2014/11, pp. 36-55, doi: 10.1016/j.phycom.2013.10.003

12. Van Eeckhaute M., Bourdoux A., De Doncker P. et al. Performance of emerging multi-carrier waveforms for 5G asynchronous communications. J Wireless Com Network 2017, 29 (2017) doi:10.1186/s13638-017-0812-8.

НОВЫЕ КНИГИ

Умняшкин С.В.

Основы теории цифровой обработки сигналов: Учебное пособие. Издание пятое, исправленное и дополненное. М: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 550 с.: ил.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров «Прикладная математика», «Информатика и вычислительная техника», и направлено на изучение теоретических основ цифровой обработки сигналов (ЦОС). Помимо базовых разделов ЦОС, связанных с цифровым представлением сигналов, анализом и синтезом цифровых фильтров, в пособии рассматриваются вопросы многоскоростной обработки сигналов, адаптивной фильтрации, дискретного спектрального анализа. Значительное внимание уделено таким специальным разделам ЦОС, как эффективное представление сигналов (сжатие данных), теория и приложения дискретных вейвлет-преобразований.

Пособие также может быть рекомендовано в качестве дополнительного учебного материала для других инженерных направлений подготовки, связанных с ЦОС (радиотехника, электроника, телекоммуникации и связь, автоматическое управление и др.). При этом базовая часть материала первых глав представляет собой основу для вводного курса (уровень бакалавриата), а в полном объеме учебное пособие ориентировано на более углубленное изучение теории ЦОС в магистратуре.

Соловьев В.В.

Проектирование функциональных блоков встраиваемых систем на FPGA – М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2020 г. – 348 с.: ил.

Рассмотрены основы проектирования функциональных блоков, которые наиболее часто встречаются во встраиваемых системах, на программируемых пользователем вентильных матрицах FPGA (field programmable gate array – FPGA). Рассмотрено проектирование на FPGA путем описания на языке Verilog и с помощью IP-ядер блоков памяти различного типа: одно-портовой, двух-портовой RAM, ROM, FIFO, LIFO, а также сдвиговых регистров в блоках встроенной памяти. Представлено несколько методик проектирования устройств управления: в виде микропрограммного автомата (МПА) по граф-схеме алгоритма (ГСА), на основе блок-схем автоматов (ASM), а также на основе блок-схем автоматов с трактом обработки данных (ASMD) и конечных автоматов с трактом обработки данных (FSMD). Приведена методика проектирования на FPGA одно-такты процессора, а также три методики проектирования много тактовых процессоров. Особое внимание уделено отладке процессора PIC и оценке его производительности, приводятся рекомендации



по увеличению производительности процессоров. Представлена общая методология проектирования цифровых фильтров, рассмотрен пример разработки цифрового фильтра в системе MATLAB, моделирования фильтра в системе ModelSim и реализация фильтра на FPGA в системе Quartus. Рассмотрены вопросы проектирования подсистем синхронизации встраиваемых систем на FPGA. Описаны принципы функционирования блоков фазовой автоподстройки частоты PLL, особенности архитектуры и функционирования блоков PLL в FPGA, а также способы конфигурирования блоков PLL в проектах на FPGA.

Для специалистов в области разработки встраиваемых систем, научных работников, аспирантов.