

## ЛИТЕРАТУРА

1. Koleshko V. M. Acoustic – electronic phenomenon of a brain and principles of designing of machines and mechanisms // Col “The congress on theoretical and applied mechanics”. – Minsk, 1996. – P 47 – 49.
2. Koleshko V. M. Acoustic – electronic phenomenon and electric activity of a brain of the person // International seminar “Transfer processes in biomedical problems”. – Minsk, 1995. – P 17 – 19.
3. Колешко В.М., Апанасевич А.В. Моделирование мозговых волн и управление объектами // Proceedings of the International Conference “Advanced Information and Telemedicine Technologies for Health”. – November 8 – 10, 2005, Minsk, Belarus, Academy of Science of Belarus, 2005. – P. 228 – 232.
4. Колешко В.М., Снигирев С.А. Модель системы управления объектом на основе биоэлектрических сигналов человека // Материалы научно-практической конференции “Научная мысль информационного века”. – Киев, 2007, т. Н. – С. 35 – 38.
5. Колешко В.М., Снигирев С.А. Нейрокомпьютерный интерфейс управления машиной силой мысли [электронный ресурс] // Режим доступа: [www.rusnauka.com](http://www.rusnauka.com), свободный, яз. – рус., 2007.
6. Колешко В.М., Польшкова Е.В. Сенсорные микро-наносистемы с RFID идентификацией. – Сб. IV НПК “Нанотехнологии – производству 2007”, г. Фрязино РФ, 28 – 30 ноября 2007. – С. 97-100.
7. Колешко В.М., Польшкова Е.В., Паутинно А.А. Сенсорные микросистемы с RFID идентификацией // Теоретическая и прикладная механика, вып. 22. – Мн., 2005. – С. 51-62.

УДК 681.586: 621.316.1

*Колешко В.М., Сунка В.Я., Качан В.В.*

### **ШИРОКОПОЛОСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Развитие интеллектуальных сенсоров достигло такого уровня, когда информации для передачи стало настолько много, а потребность в ее скорейшей передаче для обработки стала такой большой, что необходимо создавать локальные высокоскоростные сети для передачи измерительной информации.

Основные виды современного сетевого взаимодействия следующие[1]:

- Сенсор имеет одностороннюю связь с пользователем и использует ее для передачи своей информации.
- Сенсор имеет двустороннюю связь с пользователем и необходимую регулировку измерительного устройства выполняет пользователь.
- Микроконтроллер сенсора выполняет обработку информации о состоянии последнего и корректирует это состояние. Связь с пользователем используется для передачи полученной информации и получения от пользователя инструкций, изменяющих программу работы микроконтроллера.
- Сенсор часть необходимых вычислений проводит у себя, передает заявку на более сложные вычисления пользователю и использует их для выполнения собственных вычислений.
- Для улучшения своих действий или надежности функционирования сенсор имеет право взаимодействовать с произвольной группой пользователей сети. При этом, сенсор может объединяться с исполнительным устройством, корректирующим поведение сенсора во внешней среде. Сенсор принимает решения по учету получаемых через сеть сведений о состоянии других сенсоров.

Существует несколько способов технической организации сети, т.е. по сути тех протоколов и оборудования, посредством которого сенсоры внутри локальной сети будут посылать данные. Распространенные способы: организация проводной сети (например, посредством витой пары.); организация беспроводной сети (к примеру, посредством технологий Wi-Fi, WiMAX). Каждая из этих технологий походит под определенные задачи. Выбор технологии

зависит от задач локальной сети, ее нагрузки, финансовых возможностей организации и необходимости объединения «мобильных» сенсоров.

Организация сети при помощи витой пары — самый распространенный и недорогой способ. Несмотря на то, что скорость в такой сети не запредельна, она вполне пригодна для целого ряда практических задач. Все сенсоры жестко привязаны к своему местоположению. Разумный выход в ситуациях, когда необходимо совмещение стационарных и мобильных сенсоров — комбинация классической проводной сети с использованием технологий беспроводного доступа, когда все стационарные сенсоры подключены к удобно расположенным сетевым кабелям, а «мобильные» сенсоры пользуются технологией беспроводной передачи данных и свободно располагаются в пространстве.

Доля оборудования для радиоканалов по оценкам специалистов на рынке будет только увеличиваться. В охранных сигнализациях и системах пожарной безопасности, к которым предъявляются повышенные требования надежности, активно используется радиоканал, т.е. беспроводная сеть.

Существует ряд требований для передачи информации внутри сети интеллектуальных сенсорных систем [2]. Во-первых, организованная по топологии «точка-многоточие» сеть должна быть широкополосной. Во-вторых, должна осуществляться возможность передачи информации на дальние расстояния. Удобнее всего передавать информацию посредством сети Интернет. В-третьих, информация должна быть защищена от утечек, должна обеспечиваться ее достоверность и надежность передачи. Так же необходим гибкий выбор ширины полосы канала, т.к. измерительная информация передается с перерывами, и логично было бы повторно использовать канал — как способ увеличить пропускаемую способность и тем самым сделать передачу информации дешевле.

Рассмотрим способы передачи сигналов, применяемые в новых беспроводных сетях. В большинстве случаев здесь применяют средства связи, которые работают на нижней границе гигагерцевого диапазона, и используют широкую полосу частот. Распространение получили два метода передачи сигналов: метод прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum) и метод частотных скачков (FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum).

Метод DSSS. Вся выделенная для передачи информации полоса частот разбивается на подканалы. Источник каждому биту данных ставит в соответствие набор битов, и эти наборы передаются параллельно по подканалам (рис. 1).

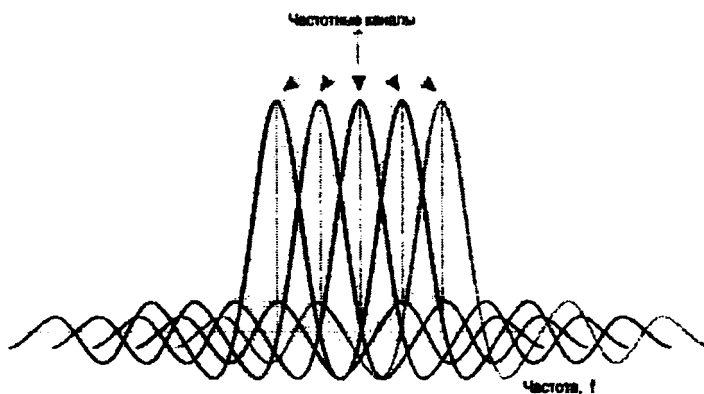


Рис. 1. Пример перекрывающихся частотных каналов с ортогональными несущими.

В приемнике закодирован способ создания наборов источником и определение значения закодированного набором бита. Другие источники работают в той же полосе частот, но применяются другие способы формирования наборов. Это позволяет приемникам воспринимать работу посторонних для него источников как шум, который не коррелирован с принимаемым набором сигналов и может быть отсеян. В каждом подканале источник передает слабый сигнал, и т.о. передача помехозащищена и скрытна.

*Метод FHSS.* Полоса частот разбивается на подканалы, которых больше, чем в *методе DSSS*. В пределах одного кванта времени передатчик работает только в одном подканале, но по закодированному правилу "перескакивает" с подканала на подканал в процессе сеанса связи. В приемнике определена последовательность переходов. Возможны конфликты при занятии подканала несколькими источниками одновременно. Поэтому в приемнике заложено правило подтверждения правильности приема. При помехе источник переходит на другой подканал. Таким

образом, в данном методе используется передача информации узкополосная, и используются сигналы, значительно более мощные, чем в методе DSSS. В разных практических приложениях предпочтение отдается *методу DSSS* или *методу FHSS*.

Широкополосные сигналы в диапазоне 2... 11 ГГц используются в сетях, основанных на семействе стандартов IEEE 802.11 [3]. Эти стандарты ориентированы на создание беспроводных локальных сетей (wireless local area networks - WLAN, Wi-Fi). Устройства по стандарту 802.11 требуют, по крайней мере, полосы 20 MHz для каждого канала (22 МГц в диапазоне частот 2,4 ГГц для IEEE 802.11b) и оперируют только в полосах частот 2,4 ГГц и 5 ГГц. Механизм управления доступом к среде базируется на протоколах CSMA/CA и CSMA/CD. Аналогично проводной сети Ethernet увеличение числа одновременно работающих пользователей влечет экспоненциальное уменьшение эффективной полосы пропускания.

Другой класс сетей, работающих в гигагерцевом диапазоне — это беспроводные персональные локальные сети (wireless personal area networks — WPAN). Для таких сетей разрабатываются стандарты группы IEEE 802.15. Сюда, например, относятся широко распространенные сети Bluetooth (IEEE 802.15.1) для объединения устройств разнесенных на несколько метров. В группе стандартов IEEE 802.15 разрабатывается стандарт IEEE 802.15.4, который предусматривает использование широкополосных высокочастотных сигналов для передачи данных со скоростью до 200 кбит/с и предназначен для сетей сенсоров, средств автоматизации и т.д. [4]

На базе стандарта IEEE 802.15.4 разработан высокоуровневый сетевой протокол ZigBee. Он ориентирован на работу со средствами телемеханики и средствами управления. На двух нижних уровнях ZigBee совпадает со стандартом IEEE 802.15.4. Протокол ZigBee допускает работу на расстоянии до 70 м, но возможна и релейная передача.

Стандартизации интерфейсов для беспроводной связи с сенсорами посвящен стандарт IEEE 1451.5. Он определяет взаимодействие приемопередатчика сенсора с оборудованием, удаленным на расстояние до 1 км.

Широкополосные сигналы применены также в сетях стандарта IEEE 802.16. Хотя этот стандарт ориентирован на сети городского масштаба (wireless metropolitan access network — WMAN, WiMAX), он решает также задачу "последней мили", т. е. обеспечивает беспроводное подключение конечных пользователей к концентраторам следующего уровня иерархии [4,5].

Работа нового беспроводного стандарта широкополосной связи (2001 г.) по первой версии стандарта IEEE 802.16-2001 предусматривала рабочую полосу частоты 10-66 ГГц, и организацию связи в пределах прямой видимости дальностью до 5 км. Данный стандарт описывал организацию широкополосной беспроводной связи с топологией «точка-многоточие» и был ориентирован на создание стационарных беспроводных сетей масштаба мегаполиса (Metropolitan Area Network, MAN). Именно поэтому данный стандарт получил также название WirelessMAN. На физическом уровне стандарт IEEE 802.16-2001 предполагал использование всего одной несущей частоты (Single-Carrier, SC), вследствие чего получил название WirelessMAN-SC [4].

Работа по прямой видимости приемника и передатчика позволила избежать одной из главных проблем радиосвязи — многолучевого распространения сигнала. Ширина каналов связи достаточно большая, 25 или 28 МГц, что позволяет достигать высокой (порядка 120 Мбит/с) скорости передачи данных.

Из-за очевидных недостатков беспроводных сетей, работающих по прямой видимости, (стандарт 802.16), они не получили широкого распространения, и был принят расширенный вариант стандарта IEEE 802.16, получивший наименование 802.16a-2003. В нем предусмотрено использование частотного диапазона от 2 до 11 ГГц. Данный стандарт стал альтернативой традиционным решениям широкополосного доступа для последней мили — кабельным модемам, xDSL и каналам T1/E1. Беспроводные сети стандарта 802.16a планируется применять как дополнительную технологию для соединения устройств стандарта IEEE 802.11b/g/a к Интернету. Однако использование частотного диапазона 2-11 ГГц (IEEE 802.16a) потребовало пересмотра техники кодирования и модуляции сигнала на физическом уровне.

Логическим продолжением стандарта IEEE 802.16a стал стандарт IEEE 802.16d, который предусматривал возможность реализации фиксированного доступа внутри помещений, а окончательно принятый стандарт IEEE 802.16d и его окончательная версия вобрала в себя и стандарт IEEE 802.16d, и 802.16a.

На стадии завершения находится стандарт IEEE 802.16e, рассматривающий вопросы роуминга взаимного перехода между сетями беспроводных стандартов IEEE 802.11 и 802.16. Сегодня пользователи беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 работают, только находясь на территории хотспота (зоны доступа). С помощью технологии IEEE 802.16e пользователи получают возможность оптимального соединения: посредством IEEE 802.11 — находясь в пределах спота, а посредством IEEE 802.16 — находясь в зоне действия городской сети WMAN.

Особенность стандарта IEEE 802.16a/d - возможность работы в условиях не прямой видимости. Это достигается за счет использования технологии ортогонального частотного разделения каналов с мультиплексированием (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), которая позволяет эффективно бороться с многолучевой интерференцией сигналов (рис. 2).

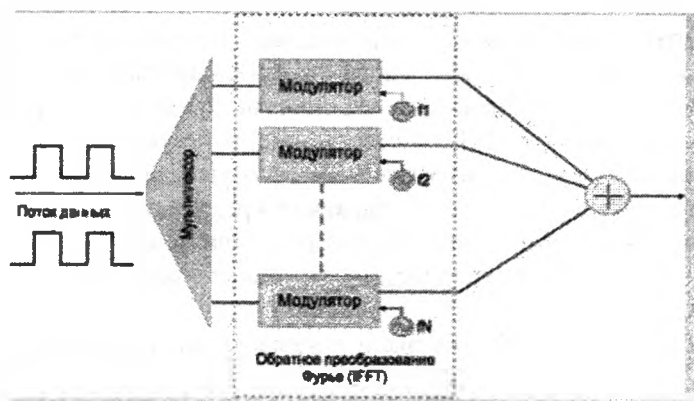


Рис. 2. Реализация метода OFDM

Эффект многолучевой интерференции сигналов заключается в многократном отражении сигнала от естественных преград.

Следствием многолучевой интерференции является искажение принимаемого сигнала. При многолучевой интерференции, возникающей при передаче сигналов, различают два крайних случая. В первом из них максимальная задержка между различными сигналами не превышает времени длительности одного символа и интерференция возникает в пределах одного передаваемого символа. Во втором случае максимальная задержка между различными сигналами больше длительности одного символа, а в результате интерференции складываются сигналы, представляющие разные символы, и возникает так называемая межсимвольная интерференция (Inter Symbol Interference, ISI).

Наиболее отрицательно на искажение сигнала влияет межсимвольная интерференция. Для различных символов меняются амплитуда и фаза сигнала, а значит, восстановить исходный сигнал крайне сложно. Чтобы частично компенсировать эффект многолучевого распространения, используются частотные эквалайзеры и применяется метод кодирования данных, который состоит в том, что поток передаваемых данных распределяется по множеству частотных подканалов и передача ведется параллельно на всех этих подканалах. При этом высокая скорость передачи достигается именно за счет одновременной передачи данных по всем каналам, а скорость передачи в отдельном подканале вполне может быть низкой.

При частотном разделении каналов необходимо, чтобы ширина отдельного канала была, с одной стороны, достаточно узкой для минимизации искажения сигнала в пределах отдельного канала, а с другой — достаточно широкой для обеспечения требуемой скорости передачи. Для экономного использования всей полосы канала желательно как можно более плотно расположить частотные подканалы, избежав при этом межканальной интерференции, чтобы обеспечить полную независимость каналов друг от друга. Частотные каналы, удовлетворяющие перечисленным требованиям, называются ортогональными. Несущие сигналы всех частотных подканалов (а точнее, функции, описывающие эти сигналы) ортогональны друг другу. Важно, что хотя сами частотные подканалы могут частично перекрывать друг друга, ортогональность не-

сущих сигналов гарантирует частотную независимость каналов друг от друга, а значит, и отсутствие межканальной интерференции.

Рассмотренный способ деления широкополосного канала на ортогональные частотные подканалы называется ортогональным частотным разделением с мультиплексированием (OFDM). Для его реализации в передающих устройствах используется обратное быстрое преобразование Фурье (IFFT), переводящее предварительно мультиплексированный сигнал на  $n$ -каналов из временного представления в частотное. Каждый отсчет IFFT представляет собой поднесущую, которая подвергается фазовой (BPSK, QPSK) или квадратурно-амплитудной (QAM16 или QAM64) модуляции, что позволяет повысить информационную скорость передачи данных. Группа поднесущих частот, которая в данный момент переносит битовые потоки, называется символом OFDM.

В протоколе IEEE 802.11g также используется технология OFDM, однако в протоколе IEEE 802.16 предусмотрено более гибкое распределение полосы частот, используемых для передач данных. Причем это можно сделать как за счет уменьшения количества поднесущих, так и с помощью их сужения. Минимальная ширина сигнала, предусмотренная стандартом, составляет 1,25 МГц, а максимальная - 20 МГц. Естественно, что с уменьшением частотного ресурса скорость передачи уменьшается, но сама эта возможность позволяет использовать частотный спектр отдельными фрагментами, а не целиком, как это реализовано в протоколе IEEE 802.11g.

Для повышения помехоустойчивости при передаче данных в протоколе 802.16 предусмотрены сверточное кодирование с декодированием по алгоритму Витерби, коды Рида-Соломона.

В итоге в стандарте IEEE 802.16a были выделены три типа физического уровня соединений, различающихся методом модуляции сигнала:

- WirelessMAN-SC — физический уровень с одной несущей частотой;
- WirelessMAN-OFDM — ортогональное частотное разделение на 256 каналов с мультиплексированием. Реализация множественного доступа к среде передачи данных происходит за счет технологии временного разделения (Time Division Multiple Access, TDMA);
- WirelessMAN-OFDMA — ортогональное масштабируемое частотное разделение каналов с мультиплексированием. Используется разделение на 2048 поднесущие частоты. Коллективный доступ к среде передачи данных реализуется за счет объединения нескольких поднесущих частот в один канал передачи и его выделения конкретному получателю (OFD Multiple Access, OFDMA).

Физический уровень WirelessMAN-SC предназначен для применения в зоне прямой видимости передатчика и приемника. Два других уровня, основанные на ортогональном частотном разделении каналов, используются для построения сетей по топологии «точка-многоточие» в условиях отсутствия прямой видимости. Из двух OFDM-уровней уровень WirelessMAN-OFDM несколько проще для реализации с технической точки зрения и потому более перспективен для реализации.

В случае ортогонального частотного разделения на 256 каналов с мультиплексированием (WirelessMAN-OFDM) используется 256 отсчетов IFFT, из которых 192 поднесущие являются информационными, то есть применяются для передачи данных, 8 поднесущих предназначены для измерения характеристик канала связи и используются для передачи пилотных символов (pilot symbols), а остальные 56 поднесущих частот могут применяться для организации защитных интервалов, длительность которых составляет 1/4, 1/8, 1/16 или 1/32 длительности OFDM-сигнала. Ширина канала связи может быть различной и изменяется от 1,25 до 20 МГц. Ортогональное частотное разделение типа WirelessMAN-OFDMA представляет собой масштабируемое разделение каналов, и количество поднесущих не фиксировано и может составлять 512, 1024 и 2048. В зависимости от количества поднесущих меняется и ширина канала, и количество подканалов.

Особенность стандарта IEEE 802.16 - его адаптивность к внешним помеховым условиям. Система подстраивается к характеристикам канала в каждый момент времени. Например, в идеальном по энергетике канале все поднесущие OFDM будут работать с модуляцией QAM64 и скоростью сверточного кодирования 3/4, обеспечивая максимальную скорость передачи 74,81 Мбит/с. В наихудших условиях передачи используется QPSK-модуляция для всех поднесущих

и сверточное кодирование со скоростью 1/2. При этом скорость передачи составляет 1,04 Мбит/с. Протоколом предусмотрено семь различных комбинаций типов модуляции и скорости сверточного кодирования, что обеспечивает требуемую помехоустойчивость протокола и большое разнообразие возможных скоростей передачи.

Существенным отличием стандарта IEEE 802.16 от 802.11 является возможность использования протокола с разрешением конфликтов. Устройства стандарта IEEE 802.11 работают по принципам Ethernet: все они имеют равные права на доступ к радиотракту, что приводит к конфликтам и повторной попытке захвата радиоканала через случайное время. В сетях стандарта IEEE 802.16 имеется выделенное устройство — базовая станция оператора, которая разделяет своим подчиненным права доступа к радио-среде, обеспечивая более эффективное использование радиочастотного ресурса и эффективную передачу данных.

Базовые станции (Base Station, BS), как правило, применяют мультиплексирование с разделением по времени (TDM), при котором каждой абонентской станции (Subscriber Station, SS) последовательно выделяются временные слоты. Абоненты же разделяют общий канал посредством схемы множественного доступа с разделением по времени (Time Division Multiple Access, TDMA).

Для реализации режима обмена данными используются: дуплексный режим с разделением по времени (TDD) нисходящего (DownLink) и восходящего (UpLink) потоков (при этом задействуется общий канал связи) и дуплексный режим с разделением по частотам (FDD), когда нисходящий и восходящий потоки оперируют на разных каналах и обмен данными может выполняться одновременно. В таблице 1 приведены сравнительные параметры устройств выполненных по рассматриваемым стандартам.

**Таблица 1 – Краткие характеристики семейства стандартов IEEE 802.16**

Название стандарта	802.16	802.16a	802.16e
Частотный диапазон	10-66 ГГц	2-11 ГГц	2-6 ГГц
Быстродействие	32-135 Мбит/с для 28МГц-канала	до 75 Мбит/с для 28МГц-канала	до 15 Мбит/с для 5МГц-канала
Модуляция	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256, QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256, QPSK, 16QAM, 64QAM
Ширина канала	20, 25 и 28 МГц	Регулируемая 1,5-20МГц	Регулируемая 1,5-20МГц
Радиус действия	2-5 км	7-10 км, макс. радиус 50 км	2-5 км
Условия работы	Прямая видимость	Работа на отражениях	Работа на отражениях

Стандарт IEEE 802.16 обладает множеством преимуществ, в тоже время последние стандарты IEEE 802.16a/d/e предоставляют очень широкие возможности для создания беспроводных сетей интеллектуальных измерительных сенсорных систем и передачи измерительной информации от них к месту назначения посредством сети Интернет с высокой скоростью и надежностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стецюра Г. Г. Сети интеллектуальных датчиков и исполнительных устройств // Датчики и системы. – 2005. – №11. – С. 69-76.
2. Деслинг Й., Линдгрэн П. Технология связи датчиков для создания окружающего интеллекта // Датчики и системы. – 2005. – №12. – С. 63-72.
3. <http://standards.ieee.org/getieee802/portfolio.html> - стандарты IEEE 802.11-802.16 от 23.12.2008.
4. Семенов Ю. А. Стандарт широкополосной беспроводной связи IEEE 802.16 // book.itep.ru.
5. <http://www.compress.ru/Article.aspx?id=9948> - стандарт 802.16 от 23.12.2008.