

Лекция №6: Сенсорные сети

План лекции:

- I Стандарты WPAN (IEEE 802.15).
 - II Стандарт IEEE 802.15.1 (Bluetooth).
 - III Стандарт IEEE 802.15.2.
 - IV Стандарт IEEE 802.15.3 (UWB).
 - V Стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee).
 - VI MANET.
 - VII Алгоритмы маршрутизации в MANET.
 - VIII Итог.
-

I СТАНДАРТЫ WPAN (IEEE 802.15)

Сенсорные сети или **беспроводные сенсорные сети** (англ. *Wireless Sensor Networks*) – это самоорганизующиеся сети, состоящие из множества миниатюрных устройств, снабжённых маломощными приёмопередатчиками, и устройств управления, объединённых в сеть посредством радиоканала. Такие сети в большинстве случаев построены на основе стандартов IEEE 802.15 WPAN.

WPAN (англ. *Wireless Personal Area Networks*) – **беспроводные персональные сети**, которые обеспечивают взаимодействие информационных узлов на расстоянии от нескольких сантиметров до 10 м. В настоящее время разработкой стандартов беспроводных персональных сетей занимается рабочая группа 802.15 Института Инженеров Электротехники и Электроники IEEE.

Предшественником стандартов IEEE 802.15 является технология IrDA (англ. *InfraRed Data Association*), описываемая группой стандартов, содержащих протоколы физического и канального уровня передачи данных в инфракрасном диапазоне.

Недостаток IrDA – необходимость прямой видимости между передатчиком и приёмником, т.к. сигнал инфракрасного диапазона распространяется прямолинейно, не проникает через препятствия и не огибает их.

В настоящее время устройства с инфракрасными портами вытеснены с рынка, устройствами, поддерживающими протоколы стандартов IEEE 802.11 и IEEE 802.15.

Рис. 6.1 иллюстрирует сравнение технических параметров, таких как

скорость передачи, информационная ёмкость и дальность соединения, различных беспроводных технологий.

Информационная емкость

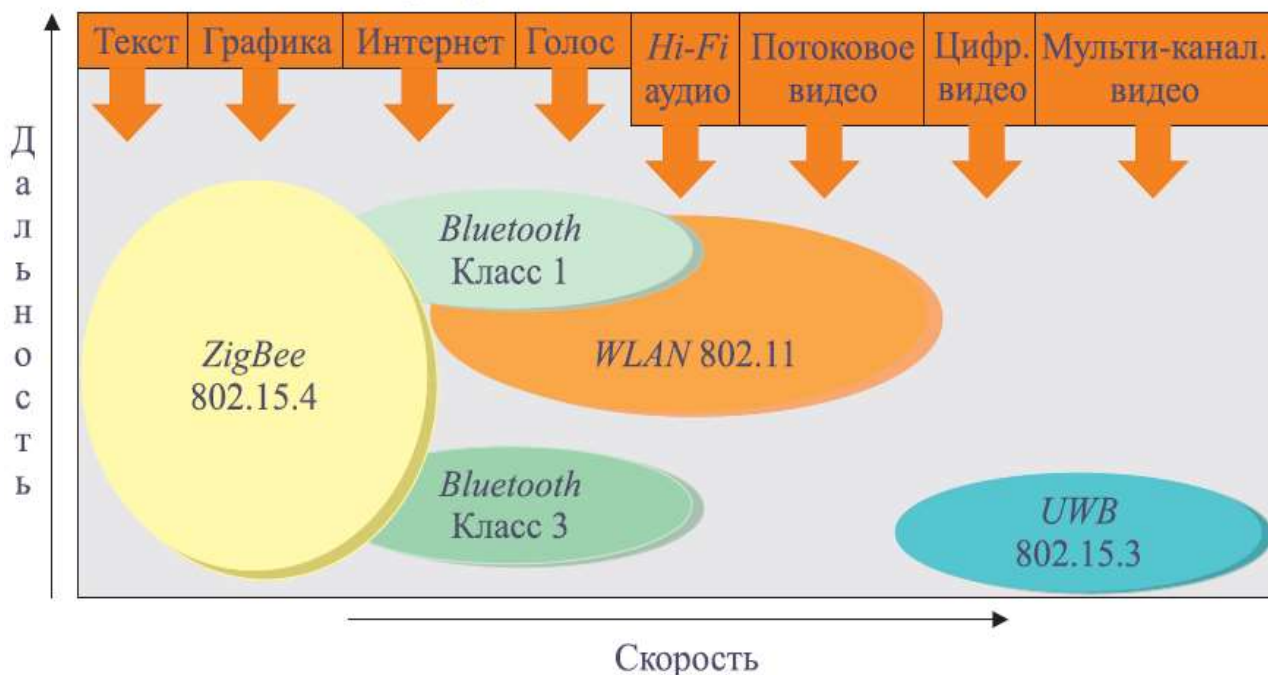


Рис. 6.1. Сравнение беспроводных технологий

II СТАНДАРТ IEEE 802.15.1 (BLUETOOTH)

Первая рабочая группа IEEE 802.15.1 сфокусирована на **Bluetooth**-технологии, которая описывает PHY и MAC уровни беспроводной персональной сети. Работа над стандартом начата в 2000 г.

Стандарт определяет топологию Bluetooth в виде **пикосети** (англ. *piconet*) в которую может входить до 255 устройств, из которых восемь могут быть активными в каждый момент времени (рис. 6.2).

Одно устройство в пикосети – главное (англ. *master*), оно отвечает за доступ к разделяемой среде передачи данных.

Остальные – подчинённые, которые могут устанавливать соединение только с главным устройством.

Неактивные устройства находятся в режиме пониженного энергопотребления.

Присоединение к пикосети происходит динамически. Главное устройство опрашивает подчинённые, подчинённое отвечает согласием или отказом, проходит процедуру аутентификации и присоединяется к главному.

Общие технические характеристики:

Расстояние: до 9 м.

Скорость передачи данных: 1-3 Мбит/с. Исключение составляет версия

Bluetooth 3.0, которая предоставляет скорость до 24 Мбит/с.

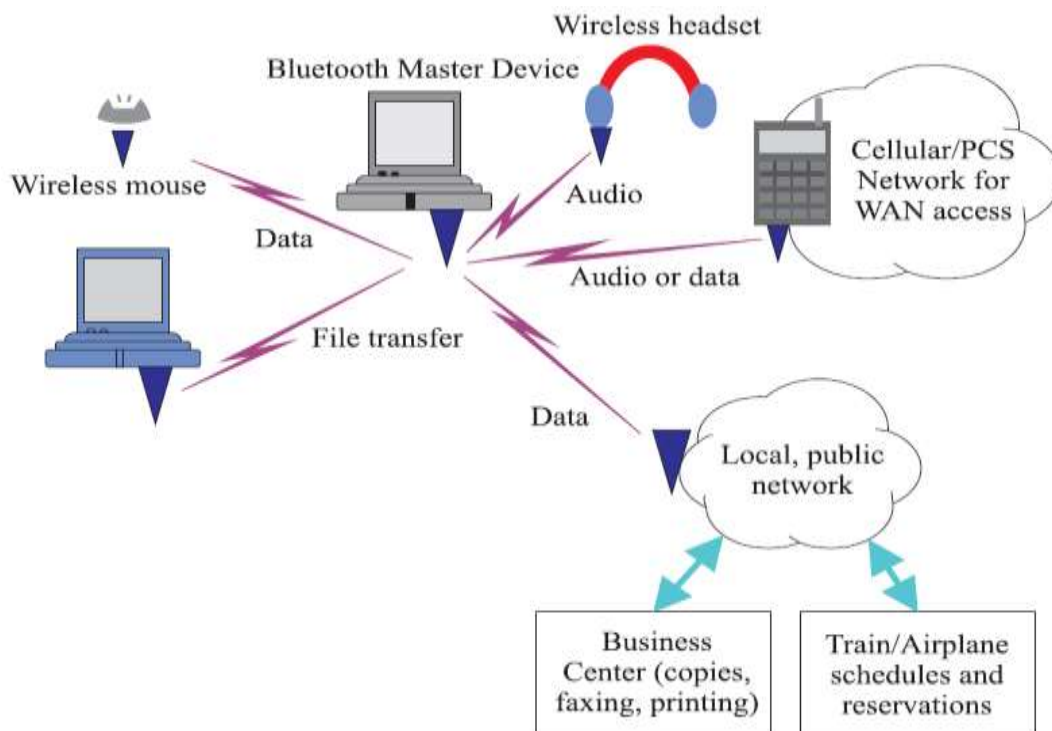


Рис. 6.2. Пикосеть Bluetooth

Физический уровень:

| | |
|--------------------------|--|
| Диапазон частот: | 2,4 – 2,4835 ГГц; |
| Многостанционный доступ: | FDMA, TDMA, CDMA; |
| Расширение спектра: | FS-SS; |
| Каналов: | 79, каждый шириной 1 МГц; |
| Модуляция: | GFSK (BT=0,5), Скорость 1 Мбит/с; $\pi/4$ -DQPSK, Скорость 2 Мбит/с; 8DPSK, Скорость 3 Мбит/с; |
| Дуплекс: | TDD. |

Канальный уровень:

Достоверность обеспечивается двумя механизмами:

- **прямая коррекция ошибок** FEC (англ. *Forward Error Correction*) – техника кодирования/декодирования, позволяющая исправлять ошибки методом упреждения;
- получение **подтверждения о приёме** АСК и повторная передача.

Безопасность обеспечивается за счёт аутентификации устройств и шифрования трафика.

Версии Bluetooth:

1.0 – плохое совмещение устройств различных производителей, обязательная передача адреса устройства при подключении, скорость от 65 до 433 кбит/с.

1.1 – исправлены ошибки 1.0, добавлена функция измерения **показателя уровня принимаемого сигнала** RSSI (англ. *Received Signal Strength Indicator*) для приблизительного местоположения объекта.

1.2 – принят стандарт IEEE 802.15.1 – 2005 г. Обновления: быстрое подключение и обнаружение, адаптивная перестройка частоты, скорость до 1 Мбит/с.

2.0 – добавлена технология **ускоренной передачи данных** в Bluetooth устройствах EDR (англ. *Enhanced Data Rate*) – скорость до 2.1 Мбит/с (теоретически до 3 Мбит/с). Снижение энергопотребления.

3.0 – добавление функции AMP (англ. Alternate MAC/PHY) для поддержки протоколов Wi-Fi и совместимости с 802.11, скорость до 24 Мбит/с и плата за это – высокое энергопотребление.

4.0 – скорость 1 Мбит/с, обновление конфиденциальности – стандарт *Advanced Encryption*, расстояние до 100 м. Функция **Bluetooth с низким энергопотреблением** BLE (англ. *Bluetooth Low Energy*) для устройств с батарейным питанием.

5.0 – скорость до 6 Мбит/с, расстояние в помещении – до 40 м., вне помещений – до 200 м. энергозатраты снижены в 2,5 раза по сравнению с предыдущими версиями Bluetooth.

5.1 – точная пеленгация объекта (до 1 см) двумя разными методами определения направления: **угол прихода** AoA (англ. *Angle of Arrival*) и **угол вылета** AoD (англ. *Angle of Departure*). Оптимизация энергопотребления и повышение надёжности соединения по Bluetooth Low Energy.

5.3 – 13 июля 2021 года специальная группа по Bluetooth SIG (англ. *Bluetooth Special Interest Group*) опубликовала спецификацию ядра Bluetooth версии 5.3.

5.4 – 7 февраля 2023 года Bluetooth SIG выпустила версию 5.4 базовой спецификации Bluetooth (последняя на сегодня).

6.0 – проанонсирован 3 сентября 2024 г.

Улучшения функций Bluetooth 5.3:

- **Connection Sub Rating** позволяет менять параметры соединения с минимальными задержками;

- введение **псевдослучайной задержки** для **интервала периодических уведомлений** (англ. *advertising interval*) позволяет избежать коллизий;

- периферийные устройства могут предоставлять подключенному центральному устройству данные альтернативных радиоканалов, которые могут использоваться центральным устройством при выполнении выбора канала во время адаптивной скачкообразной перестройки частоты;

- улучшение в *управлении размером ключа шифрования*, сокращая обмен данными между двумя устройствами;
- *улучшение классификации каналов* делает беспроводное соединение более безопасным и менее восприимчивым к помехам.

В этой версии спецификации было удалено редко используемое альтернативное расширение MAC и PHY (AMP) для упрощения стандарта.

Новые функции Bluetooth 5.4:

- *периодическая реклама с ответами PAwR* (англ. *Periodic Advertising with Responses*) представляет собой двунаправленную связь по типу «один ко многим» – полезная функция для Интернета вещей;
- *зашифрованные рекламные данные EAD* (англ. *Encrypted Advertisement Data*) для обеспечения стандартизированного подхода к безопасной передаче данных в рекламных пакетах;
- характеристика уровней безопасности – *профиль общих атрибутов GATT* (англ. *Generic Attribute Profile*) устанавливает, как данные будут организованы и переданы через соединение Bluetooth Low Energy (BLE);
- *выбор рекламного кодирования* позволяет устройствам выбирать правильный уровень исправления ошибок. Такой выбор увеличивает дальность связи и гарантирует, что устройства будут оставаться на связи даже в шумной обстановке;
- увеличение *дальности действия* до 100 м.

Это последняя версия, поэтому пока встречается редко и не даёт качественных изменений в прослушивании аудио. Все описанные выше улучшения касаются в первую очередь коммерческого использования и Интернета вещей.

Новые функции Bluetooth 6.0:

- улучшена потоковая передача аудио;
- улучшены службы определения местоположения;
- усилена безопасность и улучшено качество передачи данных;
- появилась технология *зондирование каналов Bluetooth* (англ. *Channel Sounding*), которая значительно повышает точность определения расстояния между устройствами даже на расстоянии до 200 метров.

Bluetooth 6.0 – это инновационная технология, которая сделает использование электровелосипедов и электросамокатов более комфортным. С помощью беспроводной связи Bluetooth 6.0 и определения расстояния с сантиметровой точностью, смартфоны и цифровые замки могут намного эффективнее взаимодействовать.

III СТАНДАРТ IEEE 802.15.2

Вторая группа определяет сосуществование беспроводных персональных сетей (WPAN) с другими беспроводными устройствами, работающими на нелицензируемых частотных диапазонах, таких, как беспроводные локальные сети (WLAN). Стандарт IEEE 802.15.2-2003 был опубликован в 2003 г., после чего деятельность целевой группы 2 была приостановлена.

IV СТАНДАРТ IEEE 802.15.3 (UWB)

Стандарт IEEE 802.15.3, принятый в 2003 г., описывает технологию *сверхширокополосной связи* UWB (англ. *Ultra-Wide Band* – сверхширокая полоса), которая представляет собой ad hoc систему в виде *пикосети*.

Размер пикосети – до 10 м, возможно дальше.

Основные требования к ней:

- высокая скорость передачи данных;
- простая инфраструктура;
- лёгкость установления соединения и вхождения в сеть;
- средства защиты данных;
- предоставление гарантированных параметров качества обслуживания

QoS.

Конфигурация пикосети UWB:

Пример пикосети представлен на рис. 6.3.

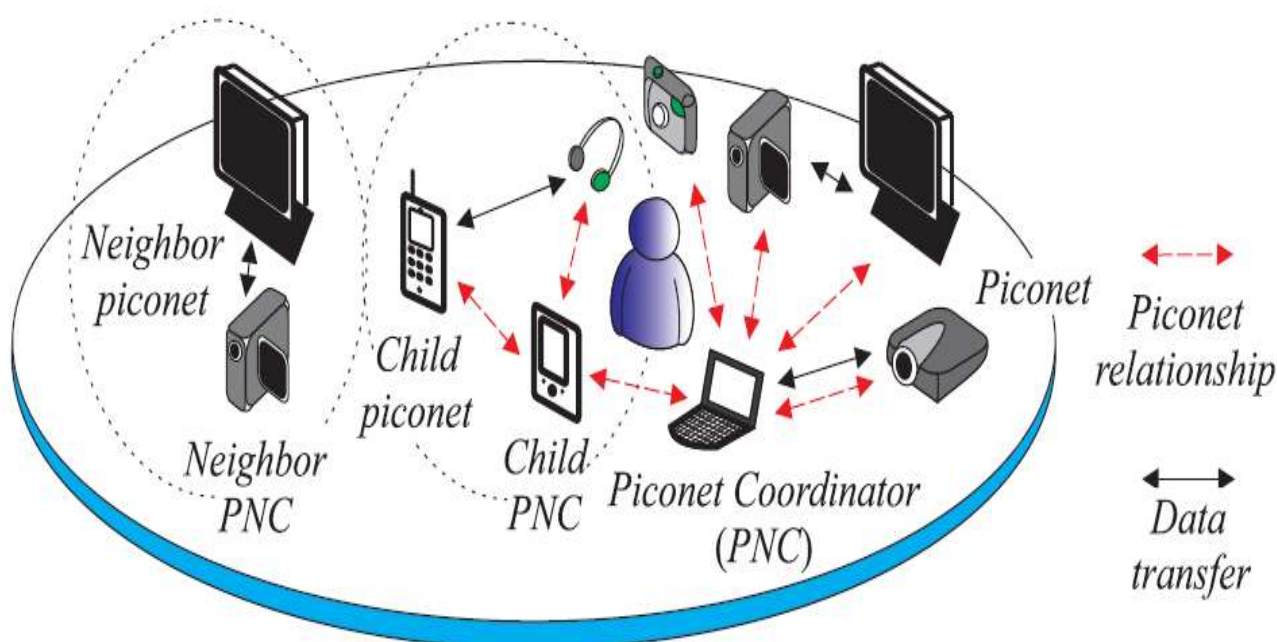


Рис. 6.3. Пикосеть UWB

Данная технология подходит для передачи больших объёмов информации (голоса, видео, файлов) с высокой скоростью (до 1 Гбит/с). Типичные примеры применения UWB – скачивание на компьютер или в облако большого количества видеозаписей с видеокамеры, фото с фотокамеры или музыкальных альбомов для обработки и хранения.

Физический уровень:

Диапазон частот: 3,1-10,6 ГГц (7,5 ГГц).

Ширина полосы: от 500 МГц.

В сверхширокополосной связи для кодирования информации в последовательности сверхкоротких импульсов используются:

– **фазоимпульсная модуляция** PPM (англ. *Pulse Position Modulation*)

При фазоимпульсной модуляции кодирование информации происходит за счёт временного сдвига между импульсами. Вместо несущего сигнала можно рассмотреть некую опорную, или базовую, последовательность импульсов, повторяющихся через строго определённые временные промежутки. Тогда кодировать информацию можно путём временного сдвига импульса относительно опорного сигнала. К примеру, нулевому биту может соответствовать импульс, передаваемый раньше опорного, а единичному биту – позже опорного (рис. 6.4).

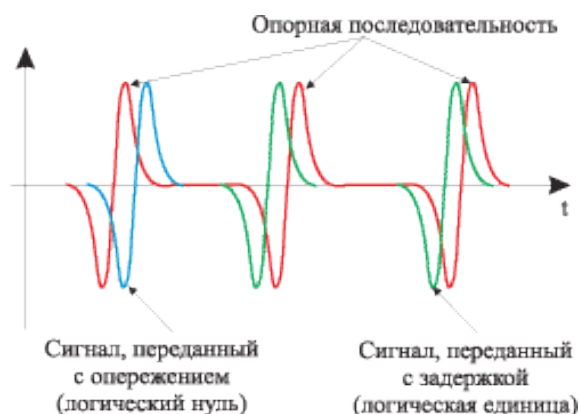


Рис. 6.4. Фазоимпульсная модуляция

– **амплитудно-импульсная модуляция** PAM (англ. *Pulse Amplitude Modulation*)

При амплитудной импульсной модуляции информация кодируется путём изменения амплитуды передаваемых импульсов. К примеру, при двухуровневой амплитудной модуляции каждый импульс передаёт один информационный бит (0 или 1), причём логической единице может соответствовать большая амплитуда импульса, а логическому нулю – меньшая. При использовании большего количества возможных значений амплитуд импульсов возможно повышение информационной скорости передачи, то есть кодирование нескольких бит в одном передаваемом символе (рис. 6.5).



Рис. 6.5. Амплитудно-импульсная модуляция

– **двухпозиционная фазовая модуляция BPM** (англ. Bi-phase Modulation)

При двухпозиционной фазовой модуляции для кодирования используются два типа импульсов: прямой и инверсный, то есть сдвинутый относительно прямого импульса по фазе на 180° . Эти два полярных импульса применяются для кодирования логического нуля и единицы. При этом информационная скорость составляет 1 бит на импульс (рис. 6.6).



Рис. 6.6. Двухпозиционная фазовая модуляция

Многополосная UWB:

Новый подход получил название **многополосной сверхширокополосной связи** (англ. *Multi-bands UWB*). Идея заключается в том, чтобы разделить весь доступный UWB-частотный диапазон на несколько узких поддиапазонов (рис. 6.6б). При этом, учитывая частотную независимость поддиапазонов, передача может осуществляться одновременно в каждом из них.

Для каждого поддиапазона существует своя несущая частота сигнала. Кроме того, в каждом из частотных поддиапазонов уже нельзя использовать сверхкороткие импульсы, так как в этом случае спектр результирующего сигнала будет слишком широким и превысит рамки отведённого частотного диапазона. К примеру, при применении частотных поддиапазонов шириной 500 МГц длительность передаваемого сигнала должна быть порядка 2 нс (ширина спектра обратно пропорциональна длительности сигнала). При использовании сигналов с частотой выше 3 ГГц для заполнения временного промежутка в 2 нс потребуется уже не одиночный импульс, а синусоидальный сигнал протяжённостью в 2 нс (волновой пакет). Передача в каждом из частотных поддиапазонов осуществляется при использовании той или иной техники

модуляции (рис. 6.7б). Одновременное использование множества частотных поддиапазонов может применяться не только для увеличения информационной скорости передачи, но и для решения проблемы множественного доступа.

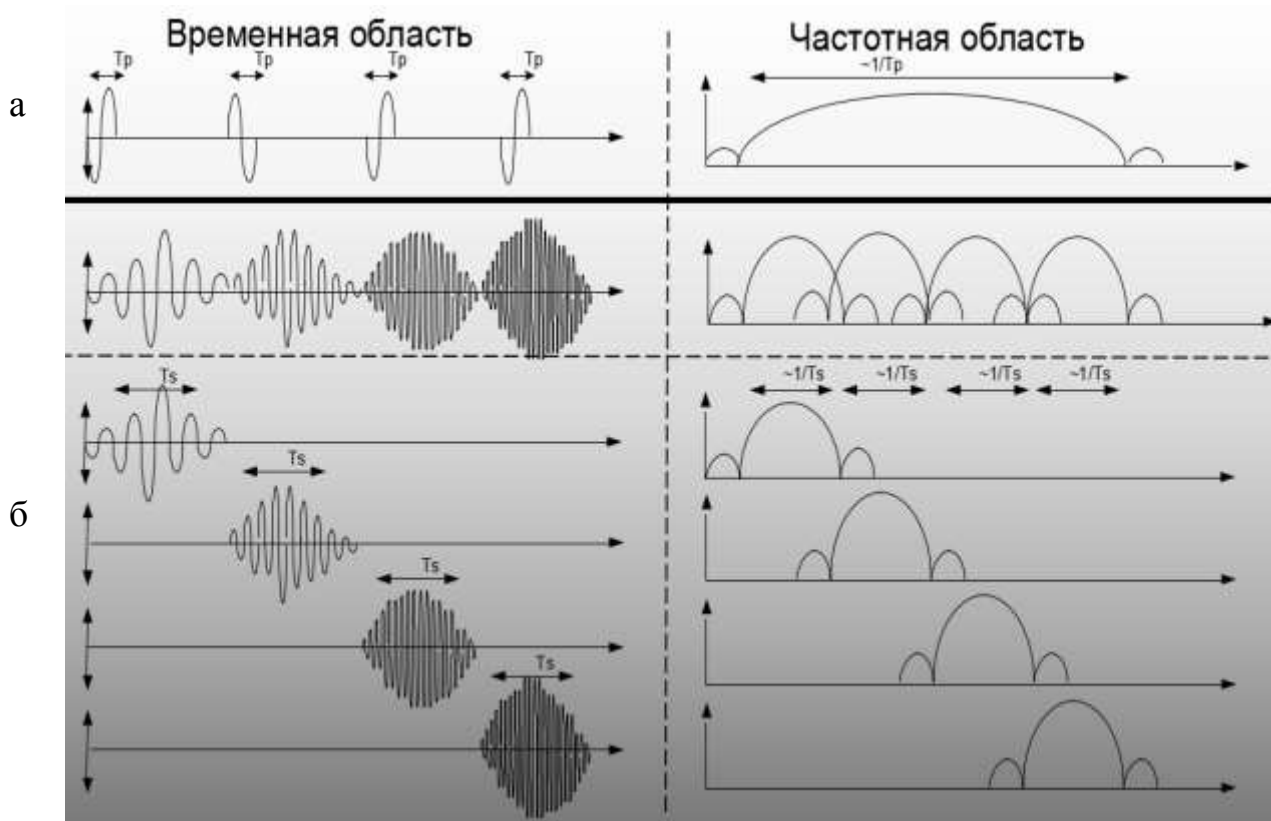


Рис. 6.7. Организация каналов в однополосной и многополосной UWB: а – однополосная; б – многополосная

Один из способов реализации многополосной *UWB MultiBand OFDM* предполагает разделение спектра на несколько полос по 528 МГц.

Основное достоинство UWB-систем заключается в скорости передачи информации, однако по причине низкой спектральной плотности сигналов скорость передачи данных в технологии UWB сильно зависит от расстояния между приёмником и передатчиком и составляет порядка 400-500 Мбит/с на расстоянии до 5 м.

Поскольку UWB работает в диапазоне «радиоэлектронного шума» мощность сигнала очень мала. Соответственно потребляемая мощность девайса – 50-70 мВт.

Технология UWB обеспечивает достаточно высокую степень безопасности. Импульсный сигнал очень трудно выделить из общего потока фоновых электромагнитных «шумов».

В качестве примера высокоскоростной беспроводной технологии соединения устройств, которая базируется на технологии UWB MultiBand OFDM, можно назвать беспроводной интерфейс WUSB (англ. *Wireless USB*) с установленной пропускной способностью 480 Мбит/с.

V СТАНДАРТ IEEE 802.15.4 (ZigBee)

Название стандарта образовано из сочетания двух слов **Zigzag** (зигзагообразная траектория движения) и **Bee** (пчела).

Спецификация ZigBee ориентирована на приложения, требующие гарантированной безопасной передачи данных при относительно небольших скоростях и возможности длительной работы сетевых устройств от автономных источников питания (батарей).

ZigBee содержит возможность выбора алгоритма маршрутизации, в зависимости от требований приложения и состояния сети.

Зона покрытия сети варьируется от 10 до 100 м (опционально до 200 м).

Топологии ZigBee:

Сети стандарта IEEE 802.15.4 используют три вида **топологий** (рис. 6.8):

- **звезда** (англ. *star*);
- **кластерное дерево** (англ. *cluster tree*);
- **ячеистая** (англ. *mesh*).

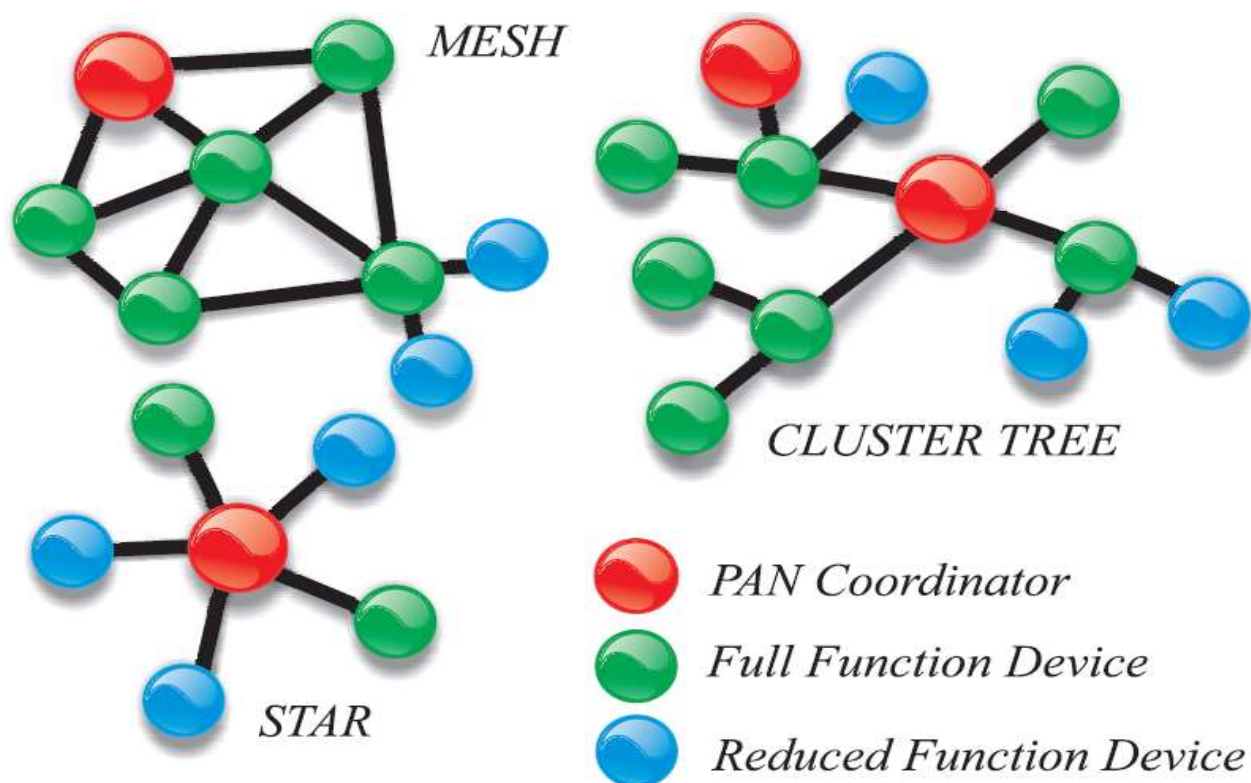


Рис. 6.8. Топологии сети ZigBee

Основными **областями применения** технологии ZigBee являются:

- беспроводные сенсорные сети;
- автоматизация жилья («Умный дом» и «Интеллектуальное здание»);
- медицинское оборудование;

- системы промышленного мониторинга и управления;
- бытовая электроника и периферия персональных компьютеров.

Физический уровень:

Диапазон частот: 2,4 ГГц (Россия) Скорость 250 кбит/с;
 868 МГц (Европа);
 915 МГц (США).
 Диапазон 2,4 ГГц разделён на 16 каналов шириной по 5 МГц каждый.
 Расширение спектра: DS-SS;
 Модуляция: OQPSK.

Канальный уровень:

MAC: CSMA/CA;
 Механизм подтверждений передачи Ack.

Безопасность:

Криптографический механизм данного стандарта базируется на симметричной ключевой схеме и использует ключи, поставляемые вышерасположенным сетевым уровнем.

Криптографический механизм обеспечивает определенные комбинации следующих услуг безопасности:

- *конфиденциальность данных;*
- *подлинность данных;*
- *защита от воспроизведения.*

VI MANET

Описанные выше стандарты и технологии применяются для организации беспроводных сенсорных сетей с динамически меняющейся структурой и полностью децентрализованным управлением (рис. 6.9).

MANET (англ. *Mobile Ad hoc Network*) – это сети, которые могут формироваться спонтанно, когда множество беспроводных узлов попадают в область действия сети. Другое название – *самоорганизующиеся сети* SON (англ. *Self-Organizing Network*).

Структура простейшей самоорганизующейся сети представляет собой некоторое количество абонентов, располагающихся в зоне, которую можно условно назвать зоной покрытия сети, и один или несколько шлюзов (например, точек доступа) к внешним сетям. Каждое из абонентских устройств, в зависимости от его мощности, обладает своим радиусом действия.

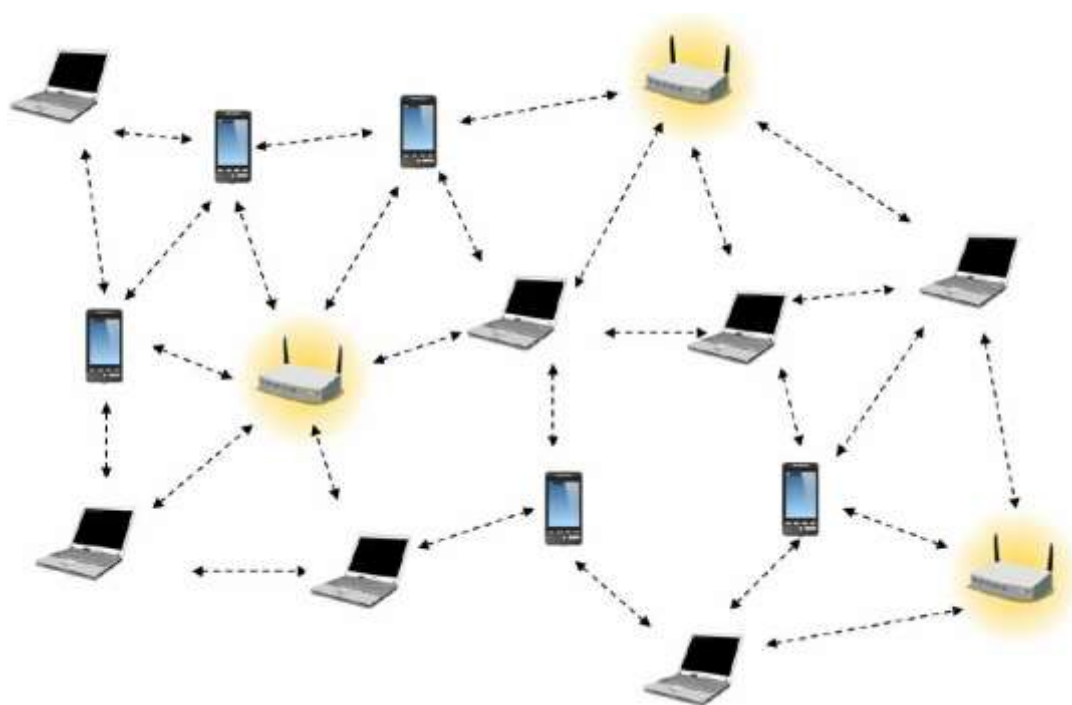


Рис. 6.9. Динамическая структура самоорганизующейся сети

Если абонент, находясь «на периферии» посылает пакет абоненту, находящемуся в центре сети или на точку доступа, происходит так называемый многоскачковый процесс передачи пакета через узлы, находящиеся на пути заранее проложенного маршрута.

Таким образом можно сказать, что каждый новый абонент за счёт своих ресурсов увеличивает радиус действия сети, поэтому мощность каждого отдельного устройства может быть минимальной. Это предполагает, как уменьшение стоимости абонентских устройств, так улучшение показателей безопасности и электромагнитной совместимости.

В подобной сети нет необходимости ни в централизованной инфраструктуре, ни в сетевом администраторе для обслуживания сети, так как сеть обслуживается самими узлами, что является главным отличием от проводных и управляемых беспроводных сетей.

VII АЛГОРИТМЫ МАРШРУТИЗАЦИИ В MANET

Поскольку MANET обладают быстро меняющейся топологией со случайным соединением узлов, маршрутизация в таких сетях обладает рядом особенностей.

Требования к маршрутизации в MANET:

1) Протоколы должны быть распределёнными. Каждый узел сети должен поддерживать маршрутизацию и не иметь жёстко закреплённых за собой функций.

2) Способность обеспечивать надёжную доставку пакетов. В условиях постоянно меняющейся топологии сложно обеспечивать работу классических механизмов гарантированной доставки.

3) Возможность обеспечивать малое время построения маршрутов несмотря на изменяющуюся топологию сети.

4) Наличие механизмов оперативного обнаружения разрывов маршрута и их устранения.

5) Отсутствие возможности образования петель в маршрутах.

6) Рассылка как можно меньшего количества служебной информации по сети.

7) Высокая масштабируемость, то есть сохранение высокой производительности при изменении размеров сети.

8) Поддержка QoS.

Классификация протоколов маршрутизации:

I По механизму формирования таблиц маршрутизации:

1.1 **Проактивные** протоколы периодически рассылают по всей сети сообщения с изменения в топологии.

Каждый узел сети на основании этих сообщений строит таблицы маршрутизации, которые использует затем при необходимости передачи сообщения какому-либо адресату.

Примеры проактивных протоколов: TBRPF, OLSR, DSDV.

1.2 **Реактивные** протоколы строят маршрут до конкретных узлов только при необходимости отправки им каких-либо данных.

Маршрут строится с использованием механизма рассылки узлом-отправителем широковещательных запросов, приняв которые получатель пересылает ответ. На основе этого ответа узел-отправитель и строит маршрут к пункту назначения и сохраняет его для повторных передач данных к этому адресату. При обнаружении разрыва маршрута запускается процедура поиска нового пути к адресату.

Примеры реактивных протоколов: DSR, AODV, AOMDV.

1.3 **Гибридные** протоколы комбинируют механизмы работы проактивных и реактивных протоколов.

Обычно сеть разбивается на ряд подсетей, в пределах которых работает один из проактивных протоколов, а для связи между подсетями используется какой-нибудь из реактивных.

Пример гибридного протокола: ZRP.

II По критерию определения маршрута:

2.1 **Дистанционно-векторные** протоколы всегда считают оптимальным маршрут с наименьшим количеством ретрансляций пакета между отправителем и адресатом.

Примеры дистанционно-векторных протоколов: AODV, DSDV, DSR.

2.2 Протоколы **состояния связи** проводят комплексную оценку маршрута по нескольким параметрам, например, количеству ретрансляций пакета, задержке на доставку пакетов и полосе пропускания канала.

Примеры протоколов состояния связи: OLSR, AOMDV.

2.3 Протоколы **географической маршрутизации** ориентируются по информации о географических координатах и положении всех узлов сети, которую получают, например, с помощью технологии GPS.

Пример протокола географической маршрутизации: LAR.

Рис. 6.10 иллюстрирует описанную выше классификацию.



Рис. 6.10. Классификация протоколов маршрутизации в ad hoc сетях

VIII ИТОГ

Сравнение технических параметров беспроводных технологий – в таблице 6.1.

Таблица 6.1. Сравнительная характеристика технологий

| Стандарт характеристика | 802.15.4 ZigBee™ | | | 802.15.1 Bluetooth | 802.11b Wi-Fi |
|--|---|--------------|---------------|--|--|
| Приложения | Мониторинг, управление, сети датчиков, домашняя/промышленная автоматика | | | Голос, данные, замена кабелей (проводного на беспроводной канал) | Данные, голос, видео, LAN |
| Преимущества | Цена, энергосбережение, размеры сети, выбор частотных диапазонов, DSSS и PSSS | | | Цена, энергосбережение, передача голоса, FHSS | Большой диапазон по скорости, DSSS |
| Частота | 868 МГц | 915 МГц | 2,4 ГГц | 2,4 ГГц | 2,4 ГГц |
| Макс. скорость | 20 Кбит/с | 40 Кбит/с | 250 Кбит/с | 1 Мбит/с | 1, 2 или 11 Мбит/с |
| Выходная мощность, ном. | От 0 дБм (1 мВт) | | | 0 дБм (класс 3) 4 дБм (класс 2) –30...20 дБм (класс 1) | 20 дБм |
| Дальность | 1–10 м (укороченный радиус действия) 10–100 м (увеличенный радиус действия) | | | 1–5 м (класс 3 – укороченный радиус) до 15 м (класс 2) 100 м (класс 1) | 10 м - 100 м |
| Чувствительность (спецификация) | –92 дБм | –85 дБм | –70 дБм | –75 дБм | |
| Размер стека | 4...32 Кбайт | | | Более 250 Кбайт | Более 1 Мбайт |
| Срок службы батареи (энергосбережение) | 100–1000+ дней | | | 1–7дней | 0,5–5 дней |
| Размер сети | 65536 (16-битные адреса), 264 (64-битные адреса) | | | Мастер +7 | 32 |
| Варианты топологий ad hoc | Точка-точка, точка- многоточка, фиксированная mesh-сеть с ограниченными функциями маршрутизатора | | | Точка-точка, точка- многоточка, Piconet, Scatternet | Точка-точка, точка- многоточка (инфраструктура) 802.11s (фиксированная mesh-сеть) |

IX СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

| | |
|----------------|--|
| AODV | Ad hoc On-Demand Distance Vector |
| AOMDV | Ad hoc On Demand Multipath Distance Vector |
| CSMA/CA | Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance |
| DSDV | Destination-Sequenced Distance-Vector |
| DSSS | Direct Sequence Spread Spectrum |
| DSR | Dynamic Source Routing |
| FHSS | Frequency-Hopping Spread Spectrum |
| GPS | Global Positioning System |
| LAR | Location-Aided Routing |
| MAC | Media Access Control |
| OLSR | Optimized Link State Routing |
| PSSS | Parallel Sequence Spread Spectrum |
| QPSK | Quadrature Phase Shift Keying |
| QoS | Quality of Service |
| TBRPF | Topology Broadcast Based on Reverse-Path Forwarding |
| WLAN | Wireless Local Area Network |
| WPAN | Wireless Personal Area Network |
| ZRP | Zone Routing Protocol |