

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное образовательное
учреждение высшего профессионального образования**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

А.М. ГОЛИКОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ
СТАНДАРТА IEEE 802.15.1 (BLUETOOTH) НА БАЗЕ ПО МАТЛАБ**

Учебно-методическое пособие по лабораторной работе

Томск 2019

Голиков, А. М. Исследование модели системы мобильной связи стандарта IEEE 802.15.1 (Bluetooth) на базе по MATLAB: Учебно-методическое пособие по лабораторной работе [Электронный ресурс] / А. М. Голиков. — Томск: ТУСУР, 2019. — 17 с.

В лабораторной работе проводится исследование системы мобильной связи, построенной по стандарту IEEE 802.15.1 (Bluetooth) на основе разработки программы для моделирования такой системы в среде MATLAB. Лабораторная работа предназначен для направления подготовки магистров 11.04.02 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" по магистерским программам подготовки: "Радиоэлектронные системы передачи информации", "Оптические системы связи и обработки информации", "Инфокоммуникационные системы беспроводного широкополосного доступа", "Защищенные системы связи", для направления подготовки магистров 11.04.01 "Радиотехника" по магистерской программе подготовки: "Радиотехнические системы и комплексы", "Радиоэлектронные устройства передачи информации", "Системы и устройства передачи, приема и обработки сигналов", "Видеоинформационные технологии и цифровое телевидение" и специалитета 11.05.01 "Радиоэлектронные системы и комплексы" специализации "Радиолокационные системы и комплексы", "Радиоэлектронные системы передачи информации", "Радиоэлектронные системы космических комплексов", а также бакалавриата направления 11.03.01 "Радиотехника" (Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов), бакалавриата 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи (Системы мобильной связи, Защищенные системы и сети связи, Системы радиосвязи и радиодоступа, Оптические системы и сети связи) и может быть полезна аспирантам.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ.....	4
2 Теоретическая часть.....	4
3. Практическая часть.....	13
ЛИТЕРАТУРА.....	17

1 Введение

Стандарт Bluetooth является компромиссным с точки зрения соотношения параметров экономичность/дальность/скорость. По своей функциональности и возможности применения в различных приложениях он имеет наибольшее число пересечений с другими стандартами группы Short Range RF. Поэтому для начала рассмотрим именно его. Основная идея Bluetooth заключалась в создании универсального, надежного и очень дешевого радиointерфейса беспроводного доступа. Технология Bluetooth позволяет обеспечить сопряжение с различным профессиональным и бытовым оборудованием в режимах передачи речи, данных и мультимедиа, при этом гарантируется его электромагнитная совместимость с другим домашним или офисным оборудованием. Как было указано в таблице, существует всего три класса устройств Bluetooth, если градировать их по излучаемой мощности: 1-й — до 100 метров (до 100 мВт); 2-й — до 10 метров (до 2,5 мВт); 3-й — до 1 метра (до 1 мВт).

2. Теоретическая часть

Для определения модели поведения при установлении соединения между различными типами устройств в технологии Bluetooth введено понятие профиль. Этим термином обозначается набор функций и возможностей, которые использует Bluetooth в качестве механизма транспортировки. Профили гарантируют возможность обмена информацией между устройствами разных производителей. Bluetooth SIG определяет 15 стандартных профилей:

- Generic Access Profile (GAP);
- Service Discover Application Profile (SDAP);
- Serial Port Profile (SPP);
- Dial-up Networking Profile (DUNP);
- Generic Object Exchange Profile (GOEP);
- Object Push Profile (OPP);
- File Transfer Profile (FTP);
- Synchronization Profile (SP);
- AV Control, Headset Profile (HSP);
- Advanced Audio Distribution Profile (A2DP);
- Basic Imaging Profile (BIP);
- Handsfree Profile (HFP);
- Human Interface Device Profile (HID);
- LAN Access Profile (LAP);
- Sim-Card Access Profile (SAP).

По характеру взаимодействия со внешними устройствами и приложениями архитектура всех существующих модулей Bluetooth может быть разделена на три вида (рис. 1). Модули с двухпроцессорной архитектурой (рис. 1а) не содержат в себе программного высокоуровневого стека Bluetooth с поддержкой стандартных профилей. Это значит, что необходимые профили Bluetooth должны быть реализованы на внешнем процессоре. Взаимодействие внешнего процессора с модулем происходит через виртуальный интерфейс HCI

(Host Controller Interface). В частном случае HCI может быть реализован через аппаратный интерфейс SPI или UART.

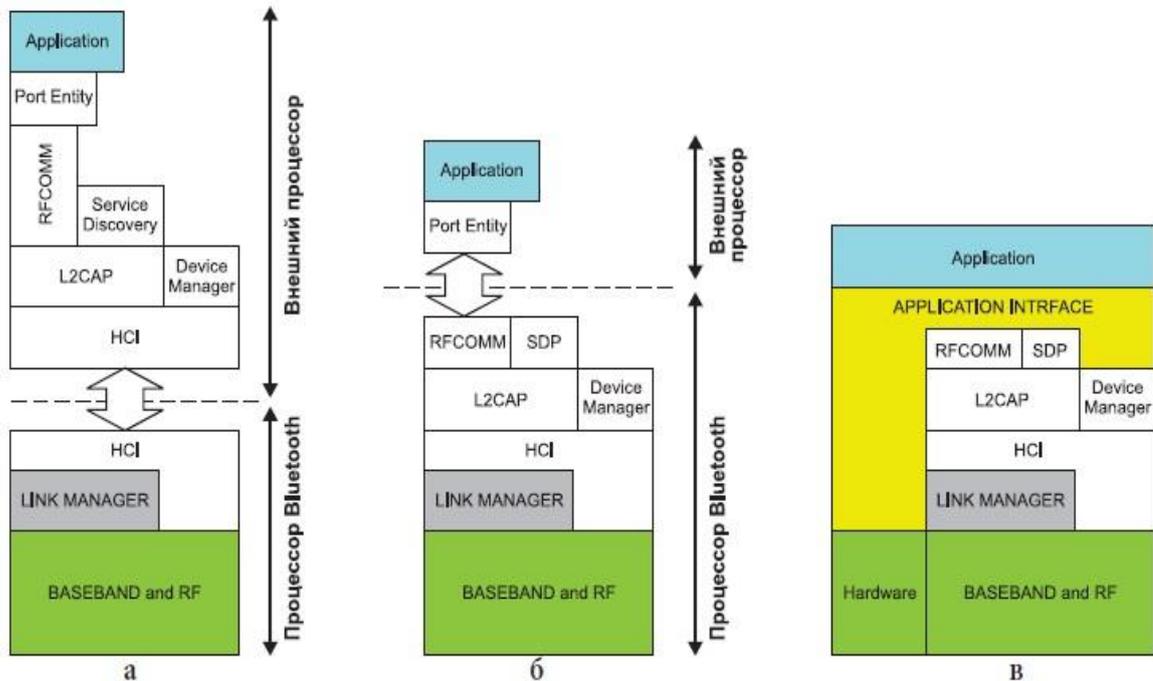


Рис. 1 - Разновидности архитектуры модулей стандарта Bluetooth:
а) двухпроцессорная; б) встроенная двухпроцессорная; в) однопроцессорная

Модули Bluetooth со встроенной двухпроцессорной архитектурой являются наиболее распространенными. Данная разновидность архитектуры подразумевает наличие стека Bluetooth высокого уровня с поддержкой стандартных профилей непосредственно во внутреннем процессоре модуля. В этом случае приложение, работающее на внешнем процессоре, взаимодействует с модулем Bluetooth через аппаратные интерфейсы.

Однопроцессорная архитектура является наименее распространенной. Для ее реализации разработчик должен создать специальное приложение, которое будет работать на внутреннем процессоре модуля Bluetooth. В этом случае модуль превращается в автономное устройство, доступ к которому через внешние аппаратные интерфейсы закрыт.

Принадлежность модуля к той или иной архитектуре может определяться как его аппаратной реализацией, так и внутренним программным обеспечением. Например, в частном случае один и тот же модуль Bluetooth может быть отнесен к любой из трех разновидностей архитектуры в зависимости от типа прошивки, загруженной во внутренний процессор модуля. Такой подход пользуется наибольшей популярностью среди зарубежных производителей.

Чтобы получить наиболее полное представление о роли Bluetooth среди других представителей группы Short Range RF, обратимся к истории (рис. 5.86). Развитие Bluetooth с самого начала шло по пути увеличения скорости обмена данными, снижения энергопотребления, повышения безопасности

и надежности соединения. Вплоть до версии 3.0 сохранялась обратная совместимость всех версий Bluetooth между собой. До сих пор в эксплуатации встречаются устройства Bluetooth версий 1.1 и 1.2, которые успешно используются совместно с 2.0 и 2.1.

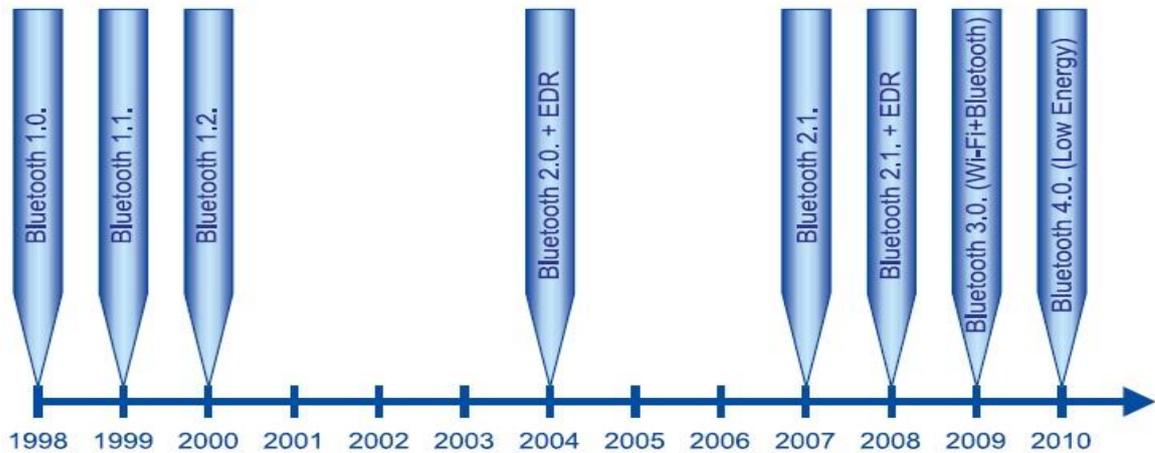


Рис. 2 - Хронология развития стандарта Bluetooth

Bluetooth 3.0 является чем-то средним между Bluetooth и Wi-Fi. Модули с ее поддержкой соединяют в себе две радиосистемы: первая обеспечивает передачу данных в 3 Мбит/с (стандартная для Bluetooth 2.0) и имеет низкое энергопотребление; вторая совместима со стандартом 802.11 (Wi-Fi) и обеспечивает возможность передачи данных со скоростью до 24 Мбит/с (сравнима со скоростью сетей Wi-Fi). Выбор радиосистемы для передачи данных зависит от размера передаваемого файла. Это один из наиболее ярких примеров объединения двух разных технологий для завоевания новых сегментов рынка. Правда, успеха эта попытка не имела: распространения Bluetooth 3.0 не получил.

Bluetooth 4.0 не имеет обратной совместимости с предыдущими версиями. Сверхнизкое энергопотребление достигается за счет использования специального алгоритма работы. Передатчик включается только на время отправки данных, что обеспечивает возможность работы от одной батарейки типа CR2032 в течение нескольких лет. Стандарт предоставляет скорость передачи данных в 1 Мбит/с при размере пакета 8–27 байт. В новой версии два Bluetooth-устройства смогут устанавливать соединение менее чем за 5 мс и поддерживать его на расстоянии до 100 м. Для этого используется усовершенствованная коррекция ошибок, а необходимый уровень безопасности обеспечивает 128-битное шифрование.

Предполагается, что Bluetooth 4.0 будет конкурировать и вытеснять ZigBee в классе малопотребляющих радиочастотных устройств с поддержкой сложных сетей. Это также является ярким примером пересечения двух разных технологий, в данном случае — ZigBee и Bluetooth.

Проанализировав современное состояние технологии Bluetooth, можно обозначить плюсы и минусы. К достоинствам стандарта относятся:

- высокий уровень стандартизации и совместимость между устройствами Bluetooth разных производителей;
- защита передаваемых данных;
- низкая стоимость;
- высокая дальность действия (до 1000 м);
- универсальность и большое разнообразие модулей под разные задачи.

Среди недостатков отметим:

- Относительно высокое энергопотребление (работа от автономных источников питания не всегда возможна). Предполагается, что этого недостатка будет лишена новая версия спецификации Bluetooth 4.0.

- Относительно невысокая скорость обмена данными (до 1 Мбит/с). Как правило, реальная скорость обмена данными ограничивается пропускной способностью внешних аппаратных интерфейсов модуля.

Одно из основных преимуществ стандарта Bluetooth заключается в его высоком уровне стандартизации и широчайшем распространении в составе пользовательских электронных устройств. Это позволяет в ряде случаев практически в два раза сэкономить время и затраты на разработку при проектировании некоторой системы сбора данных, телеметрии или управления на основе Bluetooth, поскольку в качестве одной из сторон беспроводного обмена данными может выступать, например, обычный серийно выпускаемый ноутбук или коммуникатор с поддержкой данной технологии.

Исходя из характерных особенностей модулей Bluetooth, сформировались их области применения в России и за рубежом:

- Автомобильная электроника. Модули Bluetooth могут использоваться в бортовых автомобильных системах контроля и управления. Эта область применения характерна для России.

- Системы удаленного управления и телеметрии. Здесь устройства Bluetooth могут использоваться наряду с модулями технологий Wi-Fi, ZigBee, Short Range RF 434/868 МГц. Данная область применения в равной степени актуальна как для России, так и для зарубежных стран.

Bluetooth

Ноутбуки, сотовые телефоны, смартфоны, торговые терминалы со встроенной функцией Bluetooth. Bluetooth - это современная технология беспроводной передачи данных, позволяющая соединять друг с другом практически любые устройства: мобильные телефоны, ноутбуки, принтеры, цифровые фотоаппараты и даже холодильники, микроволновые печи, кондиционеры. Соединить можно все, что соединяется (то есть имеет встроенный микрочип Bluetooth). Технология стандартизирована, следовательно, проблемы несовместимости устройств от конкурирующих фирм быть не должно.

Bluetooth - это маленький чип, представляющий собой высокочастотный (2.4 - 2.48 ГГц) приёмопередатчик, работающий в диапазоне ISM (Industry, Science and Medicine; промышленный, научный и медицинский). Для использования этих частот не требуется лицензия (исключения рассмотрим ниже). Ско-

рость передачи данных, предусматриваемая стандартом, составляет порядка 720 Кбит/с в асимметричном режиме и 420 Кбит/с в полнодуплексном режиме. Обеспечивается передача трех голосовых каналов, но не видеосигнала. Энергопотребление (мощность передатчика) не должно превышать 10 мВт. Изначально технология предполагала возможность связи на расстоянии не более 10 метров. Сегодня некоторые фирмы предлагают микросхемы Bluetooth, способные поддерживать связь на расстоянии до 100 метров. Как радиотехнология, Bluetooth способна "обходить" препятствия, поэтому соединяемые устройства могут находиться вне зоны прямой видимости. Соединение происходит автоматически, как только Bluetooth-устройства оказываются в пределах досягаемости, причем не только по принципу точка - точка (два устройства), но и по принципу точка - много точек (одно устройство работает с несколькими другими). Естественно, для реализации технологии Bluetooth на практике необходимо определенное программное обеспечение (ПО). Кстати, в новую версию операционной системы MS Windows Whistler встроена поддержка Bluetooth [16].

Передача данных Bluetooth

В стандарте Bluetooth предусмотрена дуплексная передача на основе разделения времени (Time Division Duplexing - TDD). Основное устройство передает пакеты в нечетные временные сегменты, а подчиненное устройство – в четные.

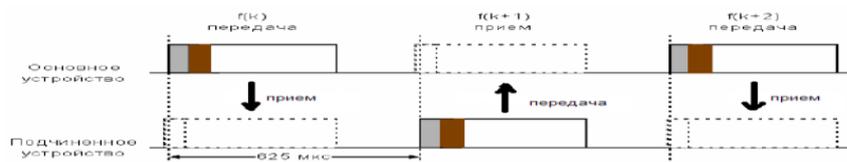


Рис. 3 - Дуплексная передача с временным разделением

Пакеты в зависимости от длины могут занимать до пяти временных сегментов. При этом частота канала не меняется до окончания передачи пакета.

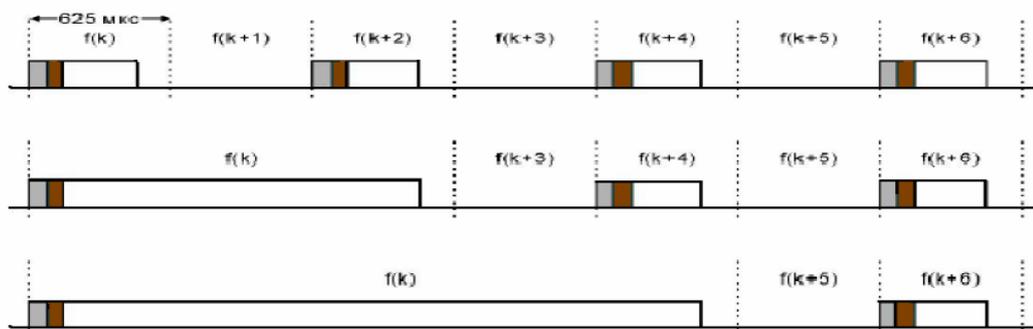


Рис. 4 - Передача пакетов различной длины

Протокол Bluetooth может поддерживать асинхронный канал данных, до трех синхронных (с постоянной скоростью) голосовых каналов или канал с одновременной асинхронной передачей данных и синхронной передачей голоса. Скорость каждого голосового канала – 64 Кбит/с в каждом направлении, асинхронного в асимметричном режиме – до 723,2 Кбит/с в прямом и 57,6 кбит/с в обратном направлениях или до 433,9 Кбит/с в каждом направлении в симметричном режиме.

Структура пакета

Стандартный пакет Bluetooth содержит код доступа длиной 72 бита, 54-битный заголовок и информационное поле длиной не более 2745 бит. Однако пакеты могут быть различных типов. Так, пакет может состоять только из кода доступа (в этом случае его длина равна 68 битам) или кода доступа и заголовка.

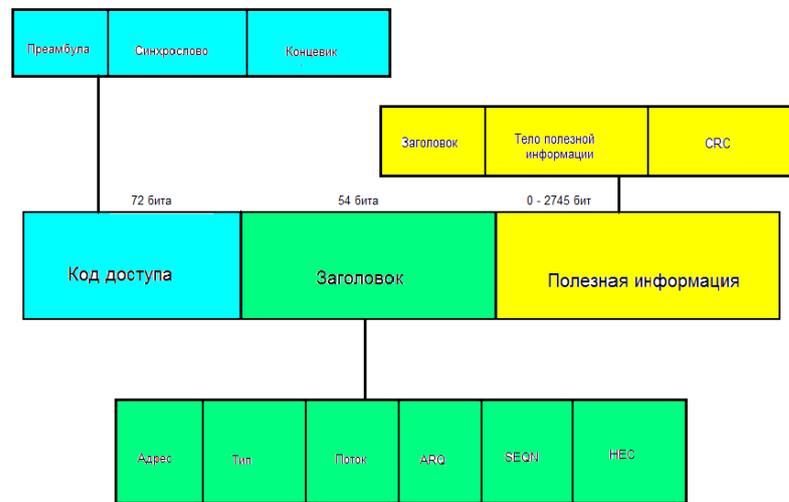


Рис. 5 - Структура пакета

Код доступа идентифицирует пакеты, принадлежащие одной пикосети, а также используется для синхронизации и процедуры запросов. Он включает преамбулу (4 бита), синхрослово (64 бита) и концевик – 4 бита контрольной суммы.

Заголовок содержит информацию для управления связью и состоит из шести полей:

- Адрес (3 бита) - адрес активного элемента;
- Тип (4 бита) - код типа данных;
- Поток (1 бит) - управление потоком данных, показывает готовность устройства к
 - приему;
 - ARQ (1 бит) - подтверждение правильного приема;
 - SEQN (1 бит) - служит для определения последовательности пакетов;
- CRC (8 бит) - контрольная сумма.

Заключительной частью общего формата пакета является полезная информация. В этой части есть два типа полей: поле голоса (синхронное) и поле данных (асинхронное). ACL пакеты имеют только поле данных, а SCO пакеты – только поле голоса. Исключением является пакет данных и голоса (Data Voice - DV), который имеет оба поля. Поле данных состоит из трех сегментов: заголовок полезной информации, тело полезной информации и возможно, CRC (Cyclic Redundancy Check) код.

- Заголовок полезной информации (8 бит). Только поля данных имеют заголовок полезной информации. Он определяет логический канал, управление потоком в логических каналах, а также имеет указатель длины полезной информации.

- Тело полезной информации (0-2721 бит). Тело полезной информации включает пользовательскую информацию. Длина этого сегмента указана в поле длины заголовка полезной информации.

- CRC (16 бит). От передаваемой информации вычисляется 16-битный циклический избыточный код (CRC), после чего он прикрепляется к информации.

Существует 4 типа контрольных пакетов: NULL, POLL, FHS, ID. Они одинаковые как для ACL, так и для SCO.

- ID-пакеты имеют длину 68 бит и применяются для пейджинга и запросов. Состоит из поля Код Доступа .

- NULL-пакеты (126 бит) состоят только из полей Код Доступа и Заголовков, играя роль подтверждений установления соединения или получения данных

- Тип POLL (126 бит) аналогичен предыдущему за исключением того, что POLL-пакеты обязывают получателя ответить.

- Пакеты FHS (366 бит) содержат информацию об адресе, классе устройства и тактовой частоте его передатчика

Работа Bluetooth

Есть два основных состояния для устройств Bluetooth: Соединение (Connection) и Режим ожидания (Standby). Предусмотрено семь субсостояний, которые используются для добавления клиента или подключения к пикосети: **page, page scan, inquiry, inquiry scan, master response, slave response** и **inquiry response**.

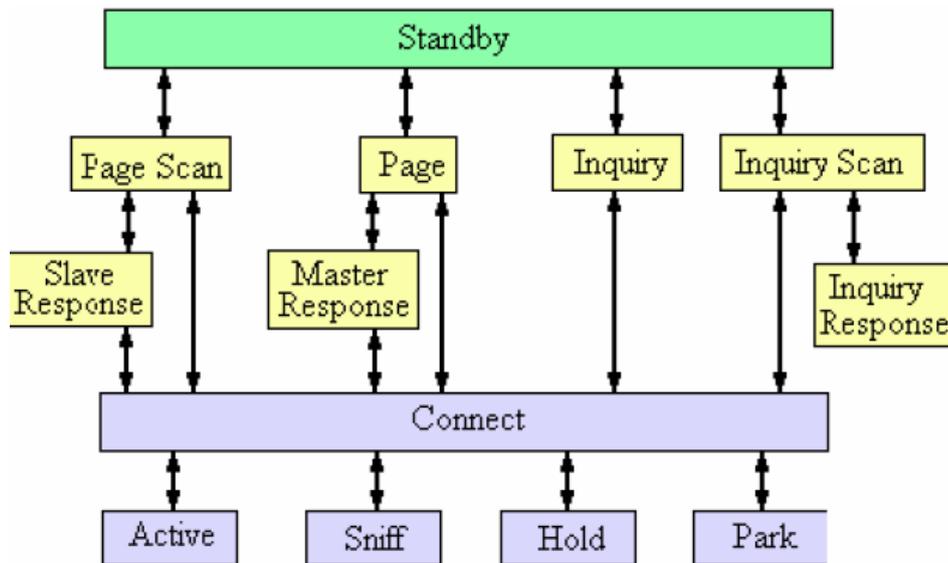


Рис. 6 - Состояние соединений

Состояние Standby по умолчанию является режимом с пониженным энергопотреблением, работает только внутренний задающий генератор. В состоянии Соединения основной узел (master) и подчиненный (slave) могут обмениваться пакетами, используя код доступа к каналу.

Соединение между устройствами происходит так - если об удаленном устройстве ничего не известно, то используются процедуры inquiry и page. Если некоторая информация о устройстве все-таки есть, то достаточно процедуры page.

Этап 1

Процедура **inquiry** позволяет устройству определить, какие приборы доступны, выяснить адреса и осуществить синхронизацию.

1.1 Посылаются пакеты inquiry и получаются отклики.

1.2 Если адресат, получивший пакет inquiry, находится в состоянии inquiry scan, тогда он способен принимать такие пакеты

1.3 Получатель переходит в состояние inquiry response и посылает отправителю пакет-отклик.

После того как процедура inquiry завершена, соединение может быть установлено с помощью процедуры paging.

Этап 2

Процедура **paging** реализует соединение. Для осуществления этой процедуры необходим адрес. Устройство, выполняющее процедуру paging, автоматически становится хозяином этого соединения.

2.1 Посылается пакет paging

2.2 Адресат получит этот пакет (находится в состоянии page Scan)

2.3 Получатель посылает отправителю пакет-отклик (находится в состоянии Slave Response)

2.4 Инициатор посылает адресату пакет FHS (находится в состоянии Master Response).

2.5 Получатель посылает отправителю второй пакет-отклик (находится в состоянии Slave Response)

2.6 Получатель и отправитель устанавливают параметры канала заданные инициатором (находятся в состоянии Master Response & Slave Response)

После установления соединения основной узел (master) посылает пакет POLL, чтобы проверить, синхронизовал ли клиент свои часы и настроился ли на коммутацию частот. Клиент при этом может откликнуться любым пакетом. После успешного обнаружения устройств новое Bluetooth устройство получает набор адресов доступных Bluetooth устройств, после чего выясняет имена всех доступных Bluetooth устройств из списка. У каждого Bluetooth устройства есть свой глобально уникальный адрес, но на уровне пользователя обычно используется не этот адрес, а имя устройства, которое может быть любым, и ему не обязательно быть глобально уникальным. Имя Bluetooth устройства может быть длиной до 248 байт, и использовать кодовую страницу в соответствии с Unicode UTF-8 (при использовании UCS-2, имя может быть укорочено до 82 символов). Также у Bluetooth есть возможность автоматического подключения Bluetooth устройств к службам, предоставляемым другими Bluetooth устройствами. Поэтому, после того как имеется список имён и адресов, выполняется поиск доступных услуг, предоставляемых различными устройствами. Для поиска возможных услуг используется специальный протокол обнаружения услуг (Service Discovery Protocol - SDP).

Устройство Bluetooth при установлении соединения может работать в четырех режимах: **Active** (активный), **Hold** (удержание), **Sniff** (прослушивание) и **Park** (пассивный).

Таблица 1. Режимы работы Bluetooth

Название режима	Описание
Active	В активном режиме устройство Bluetooth участвует в работе канала. Основной узел (master) диспетчеризует обмена на основе запросов трафика, поступающих от участников. Кроме того, этот режим предусматривает регулярные обмены с целью синхронизации клиентов. Активные клиенты прослушивают домены master-to-slave пакетов. Если к активному клиенту нет обращений, он может пребывать в пассивном состоянии (sleep) до очередной передачи со стороны главного узла
Sniff	Устройства синхронизованные в рамках пикосети могут перейти в режим экономного расходования энергии, когда их активность понижается. В режиме SNIFF , подчиненное устройство прослушивает пикосеть с пониженной частотой. Этот режим имеет наивысшую скважность рабочего цикла (наименьшая экономия энергии) из 3 экономичных режимов (sniff , hold и park)

Название режима	Описание
Hold	Устройства синхронизованные в рамках пикосети могут перейти в режим экономного расходования энергии, когда их активность понижается. Основной узел пикосети может перевести клиента в режим HOLD, когда работает только внутренний таймер. Подчиненное устройство может запросить перевода в режим HOLD. Передача данных возобновляется мгновенно, когда устройство выходит из режима HOLD. Клиент имеет промежуточную скважность (промежуточный уровень экономии энергии) из указанных 3 режимов (sniff, hold и park)
Park	В режиме PARK, устройство еще синхронизовано в рамках пикосети, но не принимает участия в обменах. Пассивные устройства отказываются от своих MAC-адресов, прослушивают трафик главного модуля с целью ресинхронизации и отслеживают ширококвещательные сообщения. Данный режим имеет минимально возможную скважность (максимальная экономия энергии) из указанных 3 режимов (sniff, hold и park). Устройства, находящиеся в режиме park, должны посылать пакеты ширококвещательно, так как лишены собственного активного адреса.

"Частотный конфликт"

Тот факт, что частотный диапазон 2.4 ГГц свободен от лицензирования, вносит определенные сложности в использование Bluetooth-устройств. В этом диапазоне работают также различные медицинские приборы, бытовая техника, беспроводные телефоны, беспроводные локальные сети стандарта IEEE. Вполне логично предположить, что они могут "конфликтовать" друг с другом. Во избежание интерференции с другими беспроводными устройствами Bluetooth работает по принципу скачкообразной перестройки частоты (1600 скачков в секунду). Переход с одной частоты на другую происходит по псевдослучайному алгоритму. Это позволяет "освободить" нужные другим устройствам частоты.

3 Практическая часть

Моделирование Bluetooth

Модель состоит из трех основных блоков:

- 1 Передатчик;
- 2 Канал;
- 3 Приемник.

Канал имеет три режима работы:

- 1 Нет канала;
- 2 AWGN канал;

Также имеется генератор сигнала стандарта 802.11, который как раз может конфликтовать с сигналами Bluetooth, для чего и применяется скачкообразная перестройка частоты.

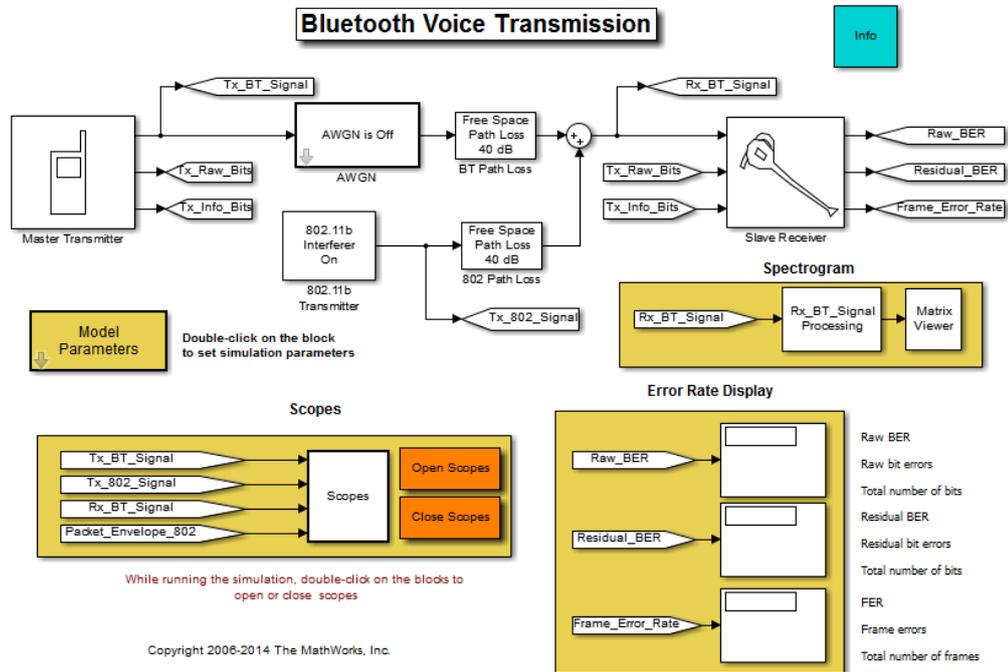


Рис. 7 - Модель Bluetooth в MATLAB

Результаты моделирования.

В результате моделирования данной схемы система строит три графика: спектр сигнала, временную форму сигнала и зависимость изменения рабочей частоты во времени (скачкообразная перестройка). На графике ниже представлен спектр Bluetooth сигнала в один из моментов времени. Одним из минусов метода перестройки частоты в системе Bluetooth являются задержки, которые хорошо видны на данной диаграмме при моделировании, также о них будет сказано ниже.

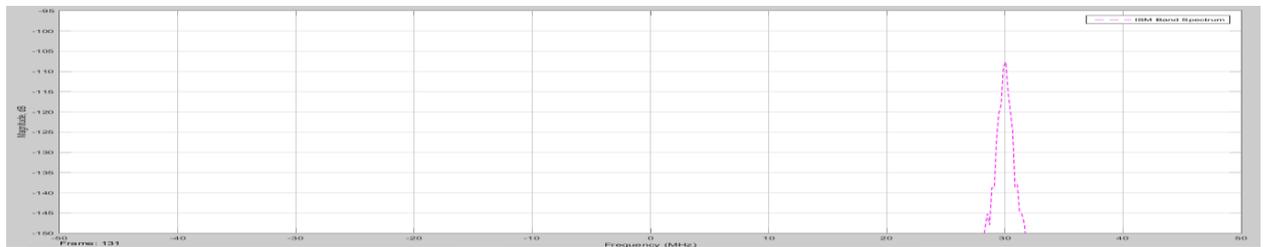


Рис. 8 - Спектр Bluetooth без мешающего сигнала 802.11

Временная форма сигнала представляет просто набор битов, как и во многих современных системах связи. О значениях каждого бита (структуре кадра) была сказано ранее.

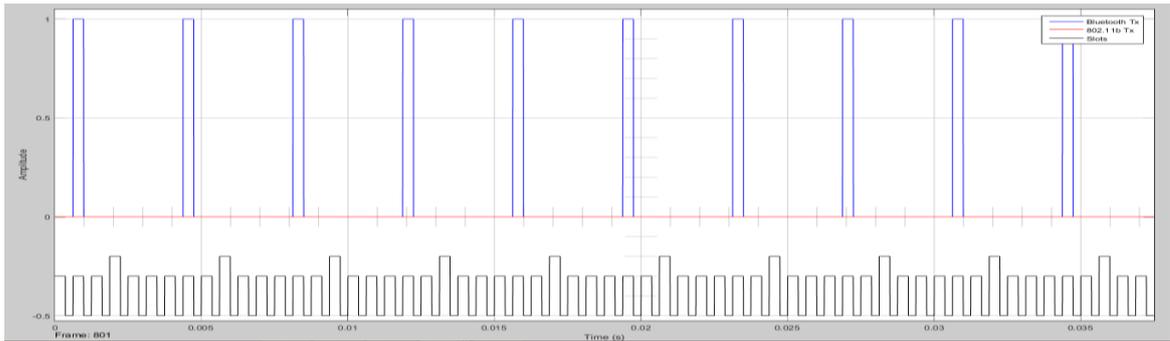


Рис. 9 - Временная диаграмма Bluetooth без мешающего сигнала 802.11

На рисунке 9 хорошо видно изменение частоты от времени. На рисунке на оси абсцисс представлена частота, а на оси ординат время. Видно, что по оси времени перестройка с одной частоты на другую занимает определенное время, что относят к недостаткам системы Bluetooth.

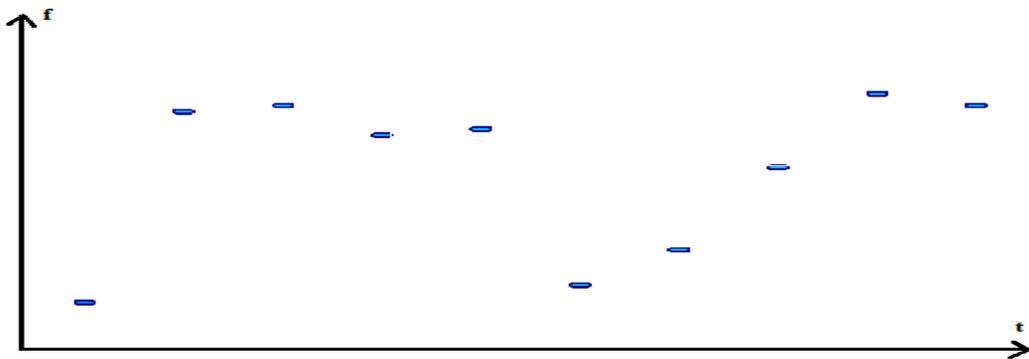


Рис. 10 - Пример скачков частоты Bluetooth во времени без мешающего сигнала 802.11(WiFi)

На рисунке 10 представлен спектр вместе с мешающим сигналом. Здесь прекрасно видно, почему для построения системы Bluetooth был выбран алгоритм FHSS, который позволяет ему работать в одном диапазоне частот со стандартом 802.11 не мешая друг другу.

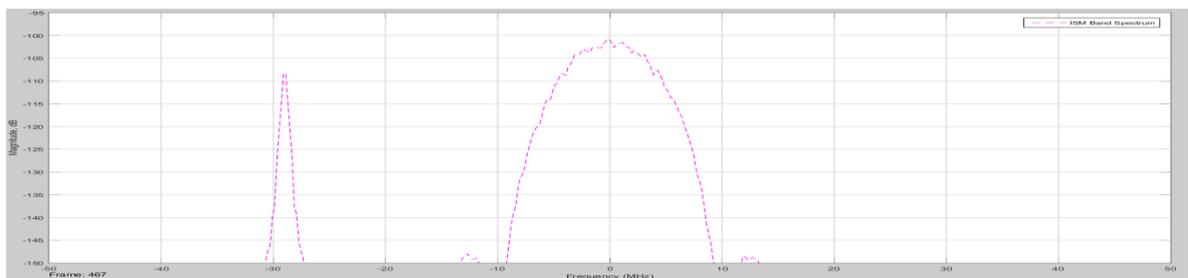


Рис. 11 - Спектр Bluetooth с мешающим сигналом 802.11

Благодаря тому, что спектры сигналов разнесены в частотной области перекрытие их во временной, не играет большой роли, т.к. сигналы можно без проблем разделить.

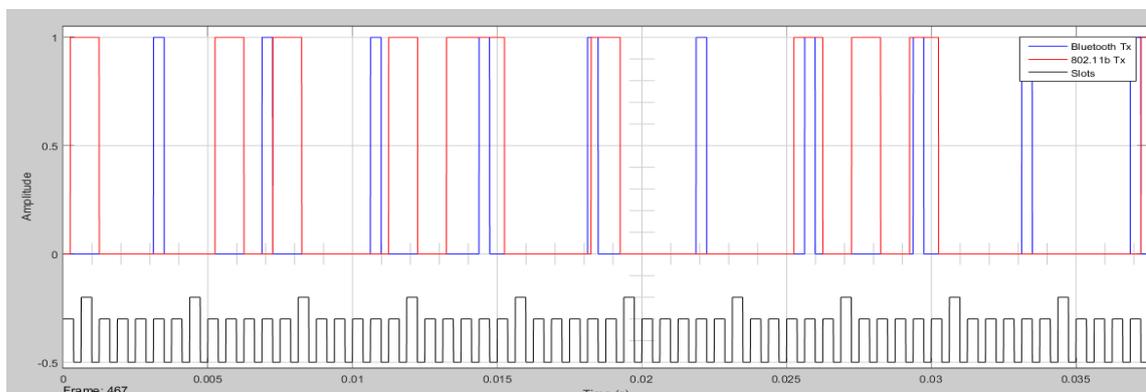


Рис. 12 - Временная диаграмма Bluetooth с мешающим сигналом 802.11

Из рисунка ниже прекрасно видно, что во время работы устройства стандарта 802.11 рабочая частота системы Bluetooth находится достаточно далеко по спектру, а в некоторые моменты занимает свободный диапазон стандарта 802.11

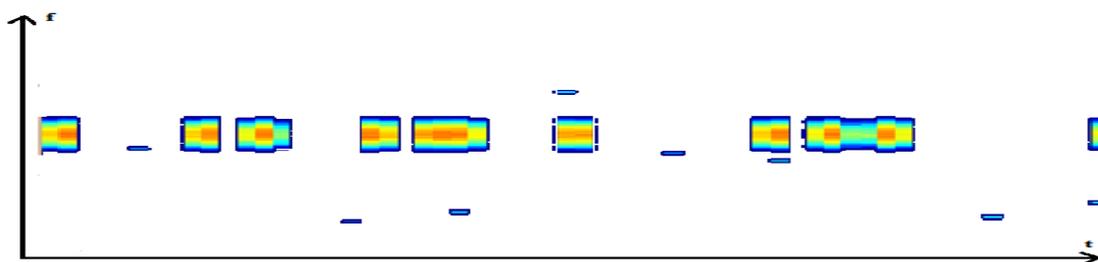


Рис. 13 - Пример скачков частоты Bluetooth во времени с мешающим сигналом 802.11

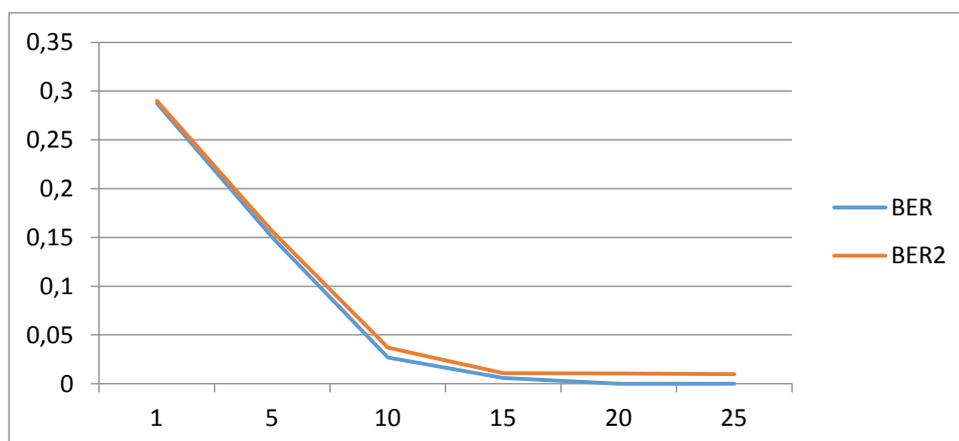


Рис. 14 - Зависимость BER от SNR. Красным цветом (верхняя кривая) выделен график при включенном мешающем сигнале 802.11

Благодаря алгоритму FHSS система не сильно подвержена влиянию других стандартов передачи данных, работающих в том же диапазоне частот. В разделе поканна технология передачи данных 802.15.1 Bluetooth, а также использована модель передачи звука по такой системе в системе Simulink. С помощью модели были построены временная диаграмма сигнала, спектр и FHSS спектр сигнала BLUETOOTH при воздействии мешающего сигнала и без него. Также была построена зависимость BER от SNR. На основе графиков зависимости BER от SNR видно, что мешающий сигнал 802.11 оказывает незначительное влияние на передачу данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голиков А.М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика: Учебное пособие / А.М. Голиков. - СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 452с.