

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

*А. Б. Анисифоров*

**СЕТЕВЫЕ СЕРВИСЫ ИТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ  
ПРЕДПРИЯТИЯ  
ЧАСТЬ 2  
БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ**

Учебное пособие

Санкт-Петербург  
2022

*Анисифоров А.Б.* Сетевые сервисы ИТ-инфраструктуры предприятия. Часть 2: Беспроводные сети : учеб. пособие / А.Б. Анисифоров. – СПб., 2022. – 87 с.

В учебном пособии изложены теоретические основы и принципы построения беспроводных сетей передачи информации. Рассмотрены стандарты персональных и локальных беспроводных сетей, технические характеристики, организация и правила взаимодействия устройств.

Пособие охватывает раздел «Технологии беспроводных сетей передачи информации» дисциплины «Сетевые сервисы ИТ-инфраструктуры предприятия» и предназначено для студентов, обучающихся по направлению 38.03.05 «Бизнес-информатика». Также пособие может быть использовано при обучении студентов по другим направлениям и дисциплинам, связанным с построением ИТ-инфраструктуры предприятия или организации.

© Анисифоров А.Б., 2022

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022

## Оглавление

1. История развития, классификация беспроводных сетей передачи информации (БСПИ), персональные БСПИ.....	4
1.1. История создания беспроводных сетей.....	4
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей.....	4
1.3. Персональные беспроводные сети.....	6
1.3.1. HomeRF (Home Radio Frequency).....	6
1.3.2. IrDA (InfraRed Data Association).....	8
1.3.3. Bluetooth.....	8
1.3.4. Стандарт IEEE 802.15.3.....	16
1.3.5. IEEE 802.15.3a.....	18
1.3.6. IEEE 802.15.4 (ZigBee).....	19
2. Кодирование и мультиплексирование данных.....	22
2.1. Методы передачи дискретных данных на физическом уровне.....	22
2.2. Модуляция при передаче аналоговых сигналов.....	22
2.3. Модуляция при передаче дискретных сигналов.....	24
2.4. Спектр модулированного сигнала.....	26
3. Локальные беспроводные сети.....	35
3.1. Стандарт IEEE 802.11.....	35
3.2. Стандарт IEEE 802.11b.....	40
3.3. Стандарт IEEE 802.11a.....	49
3.4. Стандарт IEEE 802.11g.....	57
3.5. Стандарт IEEE 802.11n.....	58
3.6. Стандарт IEEE 802.11ac.....	61
3.7. Стандарт IEEE 802.11ax.....	64
4. Взаимодействие узлов в сетях стандарта IEEE 802.11.....	70
4.1. Архитектура «Ad Hoc».....	70
4.2. Архитектура «Infrastructure Mode».....	71
4.3. Модели доступа к среде передачи данных.....	71
4.4. Режимы работы точки доступа.....	79
4.5. Формат кадра подуровня MAC стандарта 802.11.....	82
Библиографический список.....	84

# **1. История развития, классификация беспроводных сетей передачи информации (БСПИ), персональные БСПИ**

## **1.1. История создания беспроводных сетей**

ALOHAnet – первая пакетная радиосеть передачи данных появилась в 1970 г. Ее разработал и построил Норман Абрамсон совместно с группой ученых из Гавайского университета. Сеть через спутник связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В сети ALOHA («aloha» – это приветствие в гавайском диалекте английского языка) был реализован принцип подтверждения и повторной передачи пакетов (ARQ – Automatic Repeat Request), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей (CSMA – Carrier Sense Multiple Access). Тогда и начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей.

В 1972 г. ALOHA связали с сетью ARPANET.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании «Хегох» в Пало-Альто Роберт Меткалф (еще до прихода в «Хегох» защитивший докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании ARPANET) представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово «Ethernet» (эфирная сеть).

Для справки: в 1979 г. Роберт Меткалф основал знаменитую компанию «3Com», которая стала одним из лидеров рынка оборудования для компьютерных сетей и телефонии. В 2010 г. «3COM» была поглощена ИТ-гигантом «Hewlett-Packard» и стала частью подразделения «HP Networking».

В 1977 г. будущий вице-президент компании «Sony» Марио Токорои и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа и заложила основу будущих беспроводных сетей (IEEE 802.11 и 802.15).

В последующие годы беспроводные сети стали одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

## **1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей**

Обычно БСПИ подразделяют:

*по способу обработки первичной информации на:*

- Цифровые
- Аналоговые

*по ширине полосы передачи на:*

- Узкополосные
- Широкополосные
- Сверхширокополосные

*по локализации абонентов на:*

- Подвижные
- Фиксированные

*по географической протяженности на:*

- Персональные
- Локальные
- Региональные (городские)
- Глобальные

*по виду передаваемой информации на:*

- Системы передачи речи
- Данных
- Видеоинформации

Все классификации достаточно условны. Более подробно рассмотрим разделение по размерам зоны обслуживания (по географической протяженности):

1. **Персональные сети** (WPAN – Wireless Personal Area Network) – сети (системы) радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение – связь оборудования (например, компьютеров и периферийных устройств) без проводов. При этом мощность излучения передатчиков, как правило, не превышает 10 мВт.
2. **Локальные сети** (WLAN – Wireless Local Area Network) – взаимная удаленность устройств до сотен метров и мощность передатчиков до 100 мВт. Используются для построения сетей в пределах локальной зоны (здания, предприятия).
3. **Сети городского масштаба** (региональные сети) – сети теле- и радиовещания, сотовая связь, а также семейство стандартов на широкополосные беспроводные сети городского масштаба IEEE 802.16.
4. **Глобальные сети** – системы спутниковой связи. Кроме того, поскольку практически все сети сотовой связи связаны друг с другом, можно (с некоторой натяжкой) говорить о глобальных сотовых сетях.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информацией, например, на системы передачи речи (синхронные данные) и несинхронные данные.

Развитие цифровых технологий давно продемонстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. Однако каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 секунды. При задержках около 0,5 секунды восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем проблема не только в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхосигнале, который при таких задержках устранить нереально.

С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим (разовым, внезапным) помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов.

Несинхронным данным (обычным компьютерным данным), как правило, не важен режим реального времени, но абсолютно недопустима потеря данных.

### **1.3. Персональные беспроводные сети**

Персональные беспроводные сети передачи данных стали появляться в середине 90-х годов XX века. К концу 90-х практически одновременно появилось сразу несколько разработок персональных БСПИ, среди которых:

- HomeRF
- Bluetooth
- UWB (технология сверхширокополосной связи)

Рассмотрим принципы работы и технические характеристики сетей HomeRF, Bluetooth, а также технологию IrDA, использующую ИК-диапазон.

#### **1.3.1. HomeRF (Home Radio Frequency)**

В марте 1998 г. сообщество производителей компьютерного и бытового оборудования создает группу Home Radio Frequency Working Group. В нее вошло около 90 фирм, среди которых Intel, Compaq, Ericsson, HP, Microsoft и другие. Цель рабочей группы – создание открытого протокола распределенного беспроводного доступа SWAP (Shared Wireless Access Protocol), который должен был лечь в основу радиосети HomeRF.

Первая спецификация HomeRF появилась 17 декабря 1998 г., последняя (HomeRF v.2.01) – 01 июля 2002 г.

В январе 2003 г. группа была расформирована.

Стандарт HomeRF задумывался как беспроводной аналог сети HomePNA (Home Phone Line Networking Alliance), которая в качестве среды передачи использовала простую телефонную линию (некий аналог Ethernet, но на телефонном проводе).

В настоящее время информации об этой технологии практически нет. На официальном сайте одного из ведущих производителей сетевого оборудования компании «D-Link» (<http://dlink.ru>) представлен только один продукт HomePNA (устаревший и снятый с производства) – мост HomePNA–Ethernet «DHN–1000». В 2001 г. сайте [ixbt.com](http://ixbt.com) опубликована статья Виктора Федосеева «Технология HomePNA 1.0 и 2.0». В ней говорится о скоростных характеристиках технологии, достигнутых к тому времени, а именно: до 10 Мбит/с на небольших расстояниях и около 3 Мбит/с на расстоянии около 1 км.

#### Технические характеристики HomeRF

- 1) Частотный диапазон – ISM (Industrial Scientific and Medical) – не требует лицензирования: 2.4...2.4835 ГГц.
- 2) Используемый метод расширения спектра – FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum – скачкообразная перестройка частоты) – 50 скачков в секунду.
- 3) Мощность передатчика:  $P = 100$  мВт.
- 4) Скорость передачи данных: 1 и 2 Мбит/с (в версии 2.0 увеличена до 10 Мбит/с).
- 5) Радиус действия: до 50 метров.
- 6) Количество устройств в сети: до 127.
- 7) Защита информации: алгоритм шифрования Blowfish.

Кроме того, HomeRF поддерживает до 6 полнодуплексных голосовых каналов. При транспортировке голоса используется метод множественного доступа с временным разделением каналов (TDMA – Time Division Multiple Access), заимствованный у сетей DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunication).

При транспортировке трафика данных используется метод множественного доступа с контролем несущей и **предотвращением** коллизий (CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).

В 2003 г. после выхода Intel из рабочей группы судьба технологии была предрешена. Intel и другие производители переключились на разработки, связанные с технологией IEEE 802.11.

### **1.3.2. IrDA (InfraRed Data Association)**

В 1979 г. Компания Hewlett-Packard объявила о начале продаж нового компьютера с ИК портом для вывода информации на печать. После этого разработчики оборудования предложили целую серию приборов и устройств, использующих для передачи информации открытый оптический канал в ИК-диапазоне.

Широкому распространению препятствовала несовместимость, поэтому в 1993 г. (по инициативе HP) была образована IrDA. Протокол IrDA позволяет соединяться с периферией без кабеля в ИК-диапазоне с длиной волны 880 нм (850 – 900 нм) на расстоянии до 1 м.

Ассоциация IrDA определяет следующие скорости передачи (режимы):

- SIR (Slow InfraRed): от 2,4 до 115,2 Кбит/с
- MIR (Medium InfraRed): от 576 до 1152 Кбит/с
- FIR (Fast InfraRed): до 4 Мбит/с
- VFIR (Very Fast InfraRed): до 16 Мбит/с
- UFIR (Ultra Fast InfraRed): до 96 Мбит/с
- Giga-IR: до 1 Гбит/с

### **1.3.3. Bluetooth**

Bluetooth – производственная спецификация беспроводных персональных сетей. Используется для обмена информацией между такими устройствами как мобильные телефоны, ноутбуки, принтеры, мышки, клавиатуры, гарнитур, карманные компьютеры и пр. в безлицензионном диапазоне частот (ISM) на расстоянии от 10 до 100 метров.

В феврале 1998 г. для разработки стандарта персональной БСПИ создана исследовательская группа Bluetooth SIG (Special Interest Group). В нее вошли компании Ericsson, IBM, Intel, Toshiba и Nokia.

Название технологии связано с именем короля Харольда I, объединившего Данию с Южной Швецией и Южной Норвегией в единое Датское Королевство. У Харольда I было прозвище «Синезубый». Используя это название, разработчики хотели подчеркнуть универсальность стандарта.

В 2000 г. в Bluetooth SIG входили 1833 фирм, что на порядок больше, чем в группу HomeRF.



14 июня 2002 г. спецификация Bluetooth вошла в стандарт IEEE 802.15.1 (стандарт описывает подуровень MAC и физический уровень доступа в беспроводных персональных сетях WPANs).

Характеристики Bluetooth постоянно совершенствуются. Стандарт IEEE 802.15.1–2002 базируется на спецификации Bluetooth v1.1, а IEEE 802.15.1–2005 – на спецификации Bluetooth v.1.2.

#### Технические характеристики сетей стандарта 802.15.1

- 1) Частотный диапазон – ISM (2,4...2,4835 ГГц).
- 2) Используемый метод расширения (уширения) спектра – FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum – метод частотных скачков) 1600 скачков в секунду.
- 3) Мощность передатчика (P) до 100 мВт (зависит от класса устройства).
- 4) Радиус действия: 10–100 м (определяется классом устройства).  
Существует 3 класса устройств Bluetooth:
  - Class 1: P = 100 мВт – радиус действия до 100 м
  - Class 2: P = 2,5 мВт – радиус действия до 10 м (встречается чаще всего)
  - Class 3: P = 1 мВт – радиус действия до 1м (очень редкий класс)
- 5) Скорость передачи данных: около 1Мбит/с (до 720 Кбит/с в Bluetooth v.1.2)

#### Развитие технологии Bluetooth

В 2004 г. появился Bluetooth 2.0 + EDR (Enhanced Data Rate – «усовершенствованная передача данных»). EDR обеспечивает увеличение скорости передачи данных в 3 раза – до 3 Мбит/с (в реальности до 2.1 Мбит/с) за счет использования более совершенных методов модуляции.

2007 г. – Bluetooth v. 2.1.

2008 г. – Bluetooth v. 2.1 + EDR. Все изменения направлены на значительное снижение энергопотребления, повышение защищенности передаваемых данных и увеличения скорости соединения устройств.

В апреле 2009 г. принята спецификация Bluetooth 3.0 + HS (High Speed). Это своеобразный «гибрид», который для передачи данных небольшого объема использует EDR, а для передачи больших объемов данных – 802.11. Скорость обмена информацией в этом режиме – до 24 Мбит/с. Но это не означает, что он совместим с 802.11 b/g/n, т.е. с конкретными реализациями сетей Wi-Fi.

В июне 2010 г. выходит стандарт Bluetooth 4.0. Технология ориентирована на использование в миниатюрных датчиках, сенсорах (например, температуры, давления, влажности) и передачи информации на различные устрой-

ства контроля (на компьютер, мобильный телефон и др.). Технические характеристики:

- Скорость передачи данных – 1 Мбит/с
- Дальность действия – 100 м на улице, в помещении 10 м
- Почти мгновенная установка связи – 5 мс
- Шифрование AES с длиной ключа 128 бит
- Исключительно низкое энергопотребление

Зимой 2013 г. Bluetooth SIG представила новую версию стандарта – 4.1. Улучшения касались одновременной и слаженной работы беспроводной технологии и стандарта сотовой связи LTE (Long Term Evolution).

В декабре 2014 г. появляется следующая версия Bluetooth 4.2, в которой разработчики усовершенствовали параметры конфиденциальности, немного увеличили скорость передачи данных, а также представили некоторые ключевые функции для Интернета вещей.

В июне 2016 г. выходит спецификация Bluetooth 5.0. Радиус увеличен до 300 м (в помещении – до 40 м), а скорость до 48 Мбит/с. Также сделан ряд улучшений, связанных с безопасностью.

2019 г. – Bluetooth v. 5.1. Среди улучшений – снижение энергопотребления, минимизация помех, более надежное подключение и возможность определения точного местонахождения устройств, подключенных по Bluetooth.

Спецификация Bluetooth 5.2 была опубликована в январе 2020 г. Основные улучшения касались энергопотребления, безопасности и передачи звука.

В июле 2021 г. были утверждены спецификации новой версии стандарта Bluetooth 5.3. Помимо дальнейшего снижения энергопотребления и повышения безопасности появилась поддержка интерфейса ANT+, который обеспечивает многоканальность при взаимодействии ведущего устройства и ведомых, т.е. ведущий способен получать информацию сразу от нескольких ведомых, при этом не мешающих друг другу.

### Архитектура сети Bluetooth

Протокол Bluetooth поддерживает соединение точка-точка и точка-многоточка. Два или более использующих один и тот же канал устройств образуют пикосеть (piconet, мини-сеть).

В одной пикосети может быть не более 256 устройств, из них только 8 могут быть активными, а остальные находятся в режиме парковки (park).

Одно из активных устройств (устройство, инициировавшее обмен пакетами) становится ведущим (Master), а остальные принимают роль ведомых

(Slave). Ведомые устройства взаимодействуют только с ведущим, прямой обмен данными между ведомыми устройствами **невозможен**. Каждое активное устройство в пикосети получает 3-битный адрес АМА (Active Member Address). Главное (ведущее) устройство всегда имеет адрес 0. Поскольку адрес 3 бита, то и устройств может быть не более 8.

В момент присоединения к пикосети Slave-устройства принимают от Master-устройства шаблон прыжков по частотному диапазону.

Припаркованные устройства вместо адреса АМА имеют 8-битный РМА (Passive Member Address) и периодически прослушивают эфир. Если устройство с РМА «хочет что-то сказать», оно «спрашивает разрешения» у Master. Тот отбирает у какого-то активного устройства адрес АМА и передает его вновь подключившемуся.

Главное устройство может в любой момент передать свою роль какому-либо ведомому устройству.

Пикосети могут общаться между собой через устройства, находящиеся в зоне действия двух и более сетей (рис. 1.1). Такие структуры называют Scatternet. При этом одно из устройств может быть ведущим только в одной пикосети, в другой пикосети оно будет ведомым.

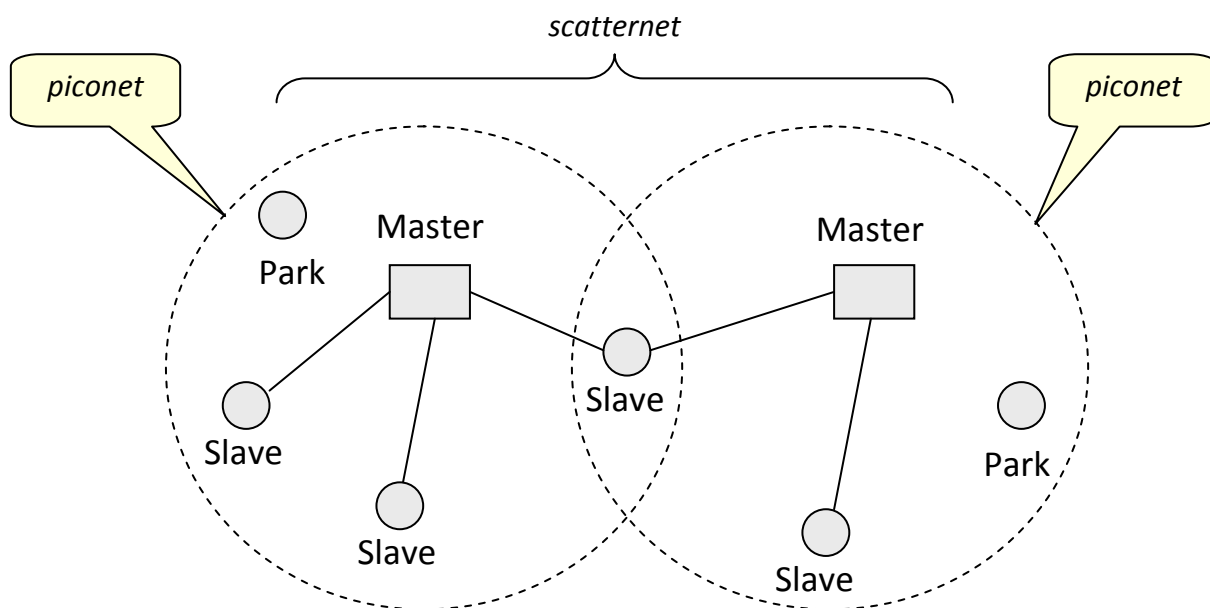


Рисунок 1.1 – Взаимодействие пикосетей Bluetooth

Эти отдельные пикосети не синхронизированы друг с другом по времени и частоте – каждая использует свою последовательность частотных скачков. Но в каждой пикосети устройства синхронизированы. Псевдослучайная последовательность скачков (длина последовательности – 227 скачков) уникальна для каждой пикосети и определяется MAC-адресом ее главного устройства.

## Кадры Bluetooth

Разделяемая среда представляет собой последовательность частотных каналов технологии FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum – метод расширения спектра скачкообразной перестройкой частоты) в диапазоне 2,4...2,4835 ГГц. Каждый частотный канал имеет ширину 1МГц, количество каналов – 79 (в большинстве стран) или 23 (Испания, Франция, Япония).

Частота частотных скачков (чиповая скорость) 1600 Гц. Следовательно, период каждого чипа составляет  $1/1600$  Гц = 625 мкс.

Главное устройство разделяет общую среду на основе временного мультиплексирования TDM (Time Division Multiplexing), используя в качестве тайм-слота время пребывания системы на одном частотном канале (т.е. 625 мкс). В Bluetooth 1.2 информация кодируется с тактовой частотой 1 МГц путем двоичной частотной манипуляции (BFSK – Binary Frequency Shift Keying).

В результате битовая скорость составляет 1 Мбит/с. Следовательно, в течение одного тайм-слота устройство пикосети Bluetooth передает 625 бит, но не все они используются для передачи полезной информации.

При смене частоты устройствам сети требуется некоторое время для синхронизации. Из-за этого кадр имеет размер 366 бит (а не 625). Структура тайм-слота представлена на рисунке 1.2

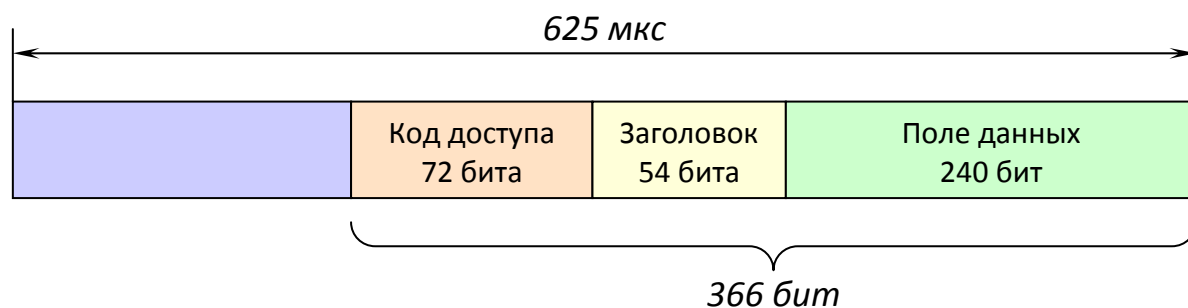


Рисунок 1.2 – Структура тайм-слота

Кадр может занимать 1, 3 или 5 тайм-слотов (рис. 1.3). Если кадр больше 1 слота, то накладные расходы на синхронизацию меньше, поскольку передача большого кадра производится без перескока на другую частоту (f). Кадры, переносящие голос (кадры канала SCO – Synchronous Connection Oriented Link – синхронный канал, ориентированный на соединение) всегда состоят из одного слота.

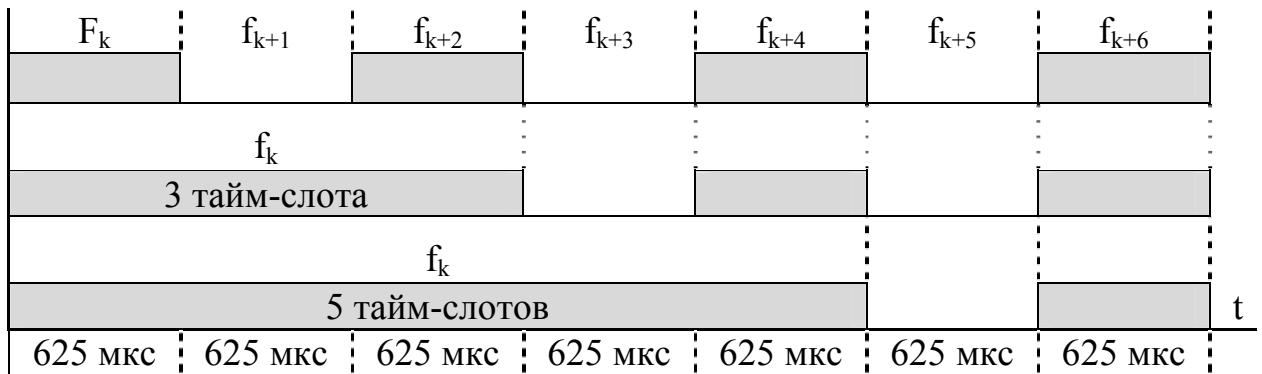


Рисунок 1.3 – Передача кадров различной длины

Рассмотрим формат кадра, состоящего из одного слота – 366 бит (рис. 1.4).

Код доступа 72 бита	Заголовок 54 бита	Поле данных 240 бит
------------------------	----------------------	------------------------

Рисунок 1.4 – Формат кадра Bluetooth

*Код доступа* (72 бита) – служит для идентификации пикосети. Содержит уникальный код главного устройства (вернее, его часть), а также код коррекции ошибок.

*Заголовок* (54 бита =  $3 \cdot 18$  бит) – включает в себя АМА (Active Member Address) – 3 бита, тип кадра – 4 бита, флаги нумерации, подтверждения, метод коррекции ошибок и другую служебную информацию. Информация заголовка передается с помощью битов 1/3 алгоритма FEC (Forward Error Correction – прямая коррекция ошибок), по сути, передается трижды.

*Поле данных* – информация, помещаемая в поле данных, может кодироваться с помощью битов 1/3 или 2/3 алгоритма FEC, либо передаваться вообще без прямой коррекции ошибок.

«1/3 FEC» означает, что к каждому биту полезной информации добавляется 2 бита кода коррекции ошибок, т.е. полезная информация составляет только 1/3 от всех переданных данных.

«2/3 FEC» означает, что к каждым 2-м битам полезной информации добавляется 1 бит кода коррекции ошибок, т.е. полезная информация составляет 2/3 от всех переданных данных.

### Поиск и стыковка устройств Bluetooth

Устройство Bluetooth обычно посылает периодические запросы для обнаружения другого устройства в зоне досягаемости

Каждое устройство имеет уникальный MAC-адрес и имя.

После предварительного обмена информацией устройства Bluetooth производят стыковку (установление безопасного соединения). Для этого требуется введение в каждое из них одного и того же пароля (PIN-кода). Устройство может быть сконфигурировано пользователем или производителем так, чтобы устанавливать соединение без процедуры стыковки.

### Пример обмена данными в пикосети

Пусть пикосеть состоит из 4-х устройств (1 главное и 3 ведомых).

Пусть все устройства используют кадры, занимающие 1 слот. На рисунке 1.5 показано, каким образом главное устройство (Master) распределяет тайм-слоты.

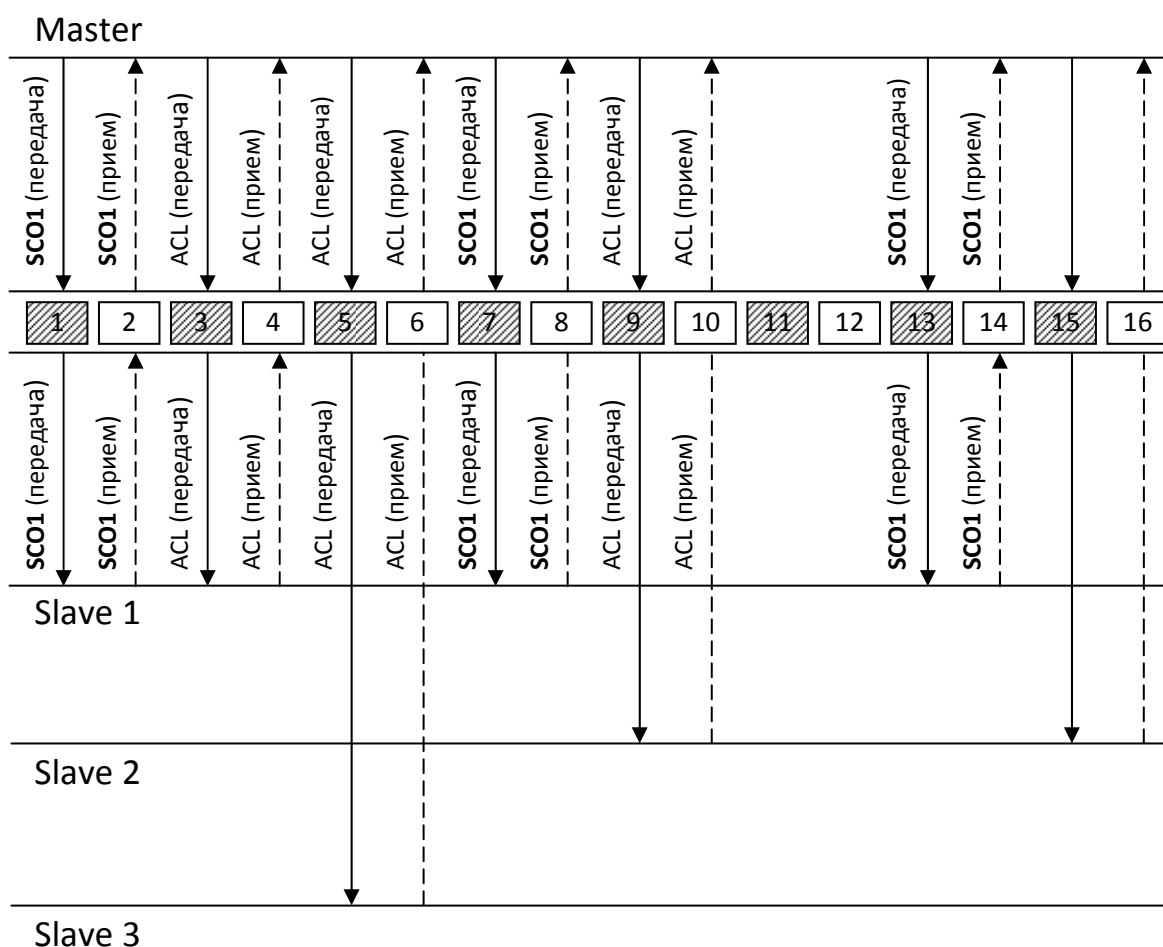


Рисунок 1.5 – Пример сценария обмена данными в пикосети Bluetooth

Для дуплексного обмена главное устройство выделяет каждому каналу пару слотов:

- I (каждый нечетный) – от Master к Slave;
- II (каждый четный) – от Slave к Master.

В нашем примере существует только один синхронный канал SCO1 между Master и Slave 1. Кроме того, в пикосети передаются и асинхронные данные (каналы ACL не нумеруются).

Каналу SCO всегда выделяется фиксированная часть пропускной способности среды, величина которой зависит от того, каким образом будет использоваться метод прямой коррекции ошибок (FEC) голосовой информации. Если FEC не применяется, то для канала SCO выделяется каждая 3-я пара слотов. В нашем примере канал SCO1 составляют пары 1–2, 7–8, 13–14 и т.д. (рис. 1.3). Это позволяет передавать синхронные данные (голос) со скоростью 64 Кбит/с в каждом направлении.

Проверим это.

Кодек оцифровывает голос с частотой 8 кГц (каждые 125 мкс), представляя каждый замер 1 байтом. Каждый кадр переносит 30 байт (240 бит), т.е. 30 замеров. Период повторения кадров:

$$6 \cdot 625 \text{ мкс} = 3750 \text{ мкс},$$

следовательно, скорость передачи данных в канале SCO (в одном направлении) составляет:

$$240 \text{ бит} / (3750 \cdot 10^{-6} \text{ с}) = 64\,000 \text{ бит/с} = 64 \text{ Кбит/с}.$$

Если используются биты 2/3 алгоритма FEC, то в поле данных кадра размещается не 30, а 20 замеров. Следовательно, каналу SCO нужно выделить каждую вторую пару слотов (например, 1–2, 5–6, 9–10 и т.д.). В результате синхронный канал «отберет» половину всей пропускной способности сети. Для организации двух голосовых каналов потребуется вся пропускная способность. В этом случае обычные (асинхронные) данные передаваться по сети не смогут, ведь голосовой трафик имеет приоритет.

Если используется FEC 1/3, то канал SCO займет все слоты.

Таким образом, в пикосети могут одновременно существовать до трех каналов SCO. Оставшаяся пропускная способность служит для передачи асинхронных данных (ACL).

При номинальной скорости 1 Мбит/с максимальная скорость передачи данных достигается при использовании больших кадров, состоящих из пяти тайм-слотов:

432,6 Кбит/с в каждом направлении (без использования FEC).

При несимметричном делении пропускной способности канала ACL можно достичь:

723,3 Кбит/с – в одном направлении и 57,6 Кбит/с – в обратном.

Когда несколько устройств используют канал, то пропускная способность делится между всеми устройствами.

Надежность передачи асинхронных данных (в канале ACL) обеспечивает механизм ARQ (Automatic Repeat Request), который предусматривает повторную передачу данных, принятых с ошибками.

### Стек протоколов Bluetooth

Bluetooth – это законченная оригинальная технология, рассчитанная на самостоятельное применение в электронных персональных устройствах, поэтому технология поддерживает полный собственный стек протоколов.

В дополнение к стеку появилось большое количество профилей (несколько десятков) например:

- для передачи стереозвука;
- для передачи файлов;
- для соединения беспроводной гарнитуры с телефоном и др.

#### **1.3.4. Стандарт IEEE 802.15.3**

Несмотря на всю свою привлекательность и универсальность, стандарт Bluetooth как действительно сетевой стандарт используется достаточно редко. Основная причина – именно универсальность. В одних приложениях ему недостает скорости (например, видео), в других – требуются более простые и дешевые устройства.

Для разрешения этих противоречий рабочая группа 802.15 создала еще две исследовательские группы (task group): Tg3 и Tg4. В результате в сентябре 2003 года появились два новых стандарта:

- IEEE 802.15.3 – стандарт для *высокоскоростной* персональной БСПИ;
- IEEE 802.15.4 – стандарт для *низкоскоростной* персональной БСПИ.

Стандарт IEEE 802.15.3 описывает работу малой БСПИ (piconet). Пикосеть объединяет несколько независимых устройств, которые могут **непосредственно** взаимодействовать друг с другом. Радиус зоны действия около 10 м.

Главные требования, предъявляемые к такой сети:

- высокая скорость передачи данных;
- простая инфраструктура;
- гарантия качества обслуживания для определенных типов данных.

Одно из устройств пикосети выполняет функции управления (координатор пикосети – PNC – piconet coordinator) (рис. 1.6).



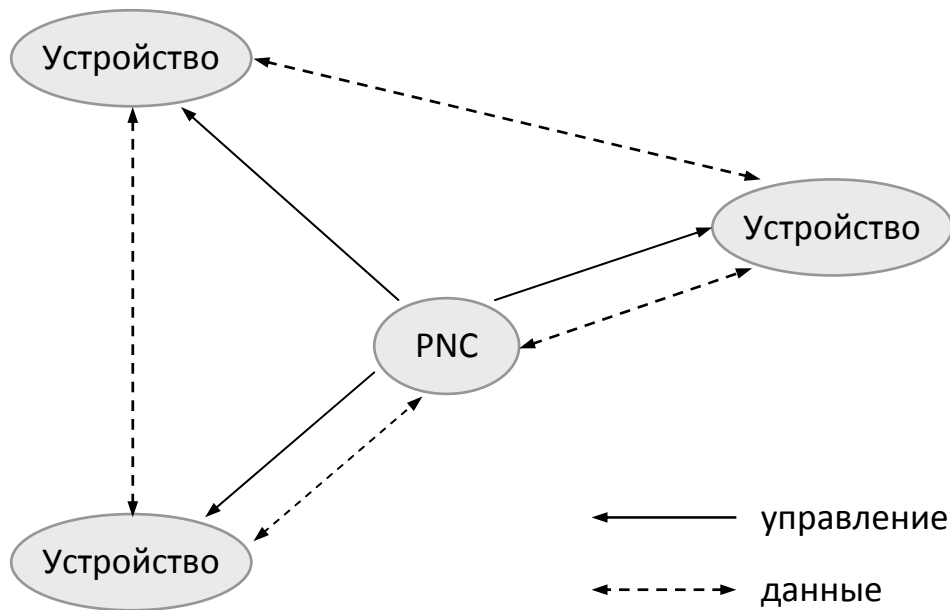


Рисунок 1.6 – Взаимодействие устройств в сети 802.15.3

В пикосети возможен обмен асинхронными и синхронными данными. Стандарт предполагает также формирования дочерних пикосетей.

Информационный обмен в пикосети основан на последовательности суперкадров (суперфреймов). Каждый суперкадр состоит из следующих элементов (рис. 1.7):

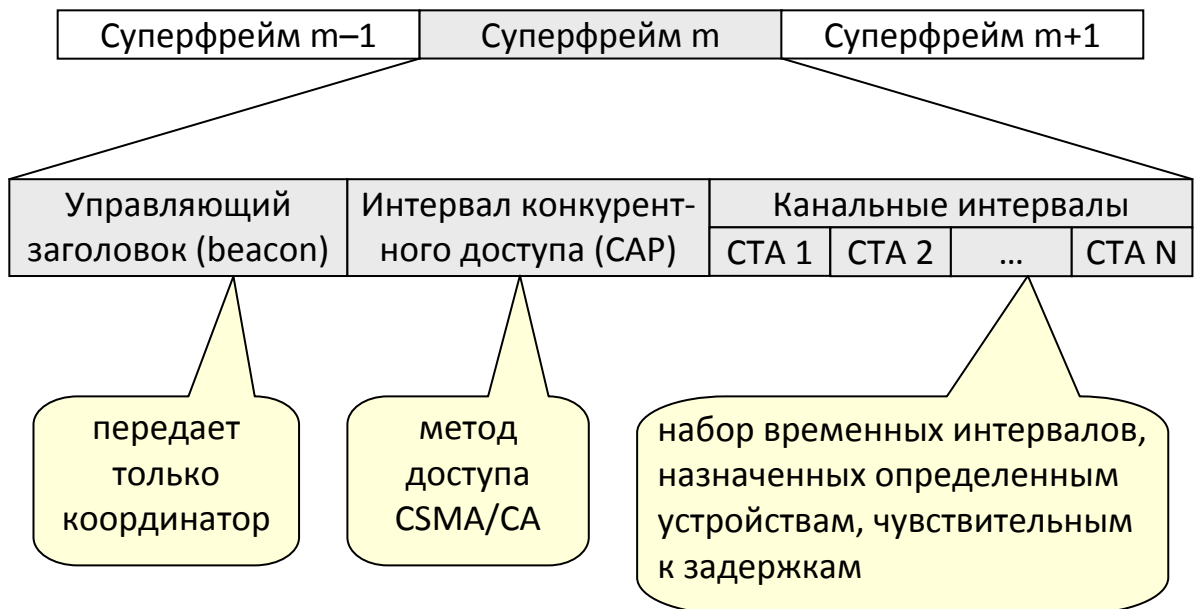


Рисунок 1.7 – Структура суперфрейма сети 802.15.3

- *Управляющий сегмент (beacon).*
- *Интервал конкурентного доступа (CAP – Contention Access Period).* В этот период доступ к каналу происходит на основе механизма CSMA/CA.

- *Канальные интервалы* (СТА – Channel Time Allocation) – это набор временных интервалов, назначенных определенным устройствам. Назначение СТА для какого-либо устройства означает, что никакое другое устройство в этот момент не может работать на передачу (рис. 1.7).

Формированием и передачей beacon (с указателем канальных интервалов) занимается координатор пикосети (PNC).

Спецификация 802.15.3 приведена для диапазона 2400 – 2483,5 МГц и предусматривает 5 допустимых скоростей:

- 11 Мбит/с;
- 22 Мбит/с – базовая скорость, ее должно поддерживать любое устройство стандарта IEEE 802.15.3;
- 33 Мбит/с;
- 44 Мбит/с;
- 55 Мбит/с.

На всех скоростях кроме базовой (22 Мбит/с) перед модуляцией данные кодируются свёрточным кодером с трехразрядным сдвиговым регистром. Используются следующие виды модуляции передаваемого сигнала: QPSK, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM. При этом в кодере к исходному набору из 1/3/4/5 бит (соответственно для каждого вида модуляции) добавляется кодовый бит с выхода трехразрядного сдвигового регистра.

### 1.3.5. Стандарт IEEE 802.15.3a

В июне 2003 г. утвердили спецификацию IEEE 802.15.3, а пользователи и разработчики беспроводного оборудования стали ожидать появления нового стандарта 802.15.3a, который позволил бы увеличить скорость обмена данными в пикосети до 110 – 480 Мбит/с и даже выше – до 1320 Мбит/с.

Достичь таких высоких скоростей можно только увеличивая спектральную ширину канала, переходя в область сверхширокополосной связи (UWB).

В феврале 2002 г. федеральная комиссия по связи (FCC) США разрешила применение сверхширокополосных устройств внутри помещений в диапазоне 3100 – 10600 МГц при максимальной мощности излучения:

$$7,41 \cdot 10^{-14} \text{ Вт/Гц } (-41,3 \text{ дБм/МГц}).$$

Однако разработчики не смогли договориться о технологии использования диапазона. Одни предлагали использовать метод OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов), другие – DSSS (метод прямой последовательности).

Таким образом, рабочая группа после почти 3-х лет работы самораспустилась в январе 2006 г.

### 1.3.6. Стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee)

Потребности потребителей сконцентрированы не только на беспроводных сетях с высокими скоростями передачи данных. Для широкого круга задач необходимо объединить устройство с довольно низкой скоростью обмена данными. Главное, чтобы они были простыми, дешевыми, со сверхнизким потреблением энергии и несложным механизмом подключения к сети.

Для решения таких задач в мае 2003 г. был разработан стандарт низкоскоростных БСПИ IEEE 802.15.4. Его разработчиком выступил альянс компаний, назвавший себя «ZigBee» (от слов «zigzag» – зигзаг и «bee» – пчела). В состав альянса входят компании Mitsubishi Electric, Motorola, Philips и др. Подразумевалось, что топология сети будет напоминать зигзагообразную траекторию полета пчелы от цветка к цветку.

Стандарт предусматривает работу в 3-х диапазонах:

- 1) 868,0...868,6 МГц – один каналом (для Европы) – скорость 20 Кбит/с;
- 2) 902...928 МГц – 10 каналов с шагом 2 МГц – скорость 40 Кбит/с;
- 3) 2400...2483,5 МГц – 16 каналов с шагом 5 МГц – скорость 250 Кбит/с.

Метод расширения спектра – DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Расширение спектра методом прямой последовательности рассматривается подробно в материалах по стандарту 802.11b.

Модуляция и расширяющие последовательности для диапазонов 868/915 и 2,4 ГГц различны.

В сети 802.15.4 могут быть 2 типа устройств:

- FFD – Full Function Device (полифункциональные);
- RFD – Reduced Function Device (с уменьшенной функциональностью).

Основное отличие: FFD могут устанавливать соединение с любым устройством, а RFD – только с FFD. В каждой сети должен быть координатор, его функции может выполнять только FFD.

Расстояние между устройствами 10 – 75м (в некоторых реализациях до 1600 м).

Возможные топологии пикосетей 802.15.4 могут строиться на основе двух крайних вариантов, представленных на рисунке 1.8. Это «звезда» и «полносвязный граф». В любом случае в сети должен быть координатор.

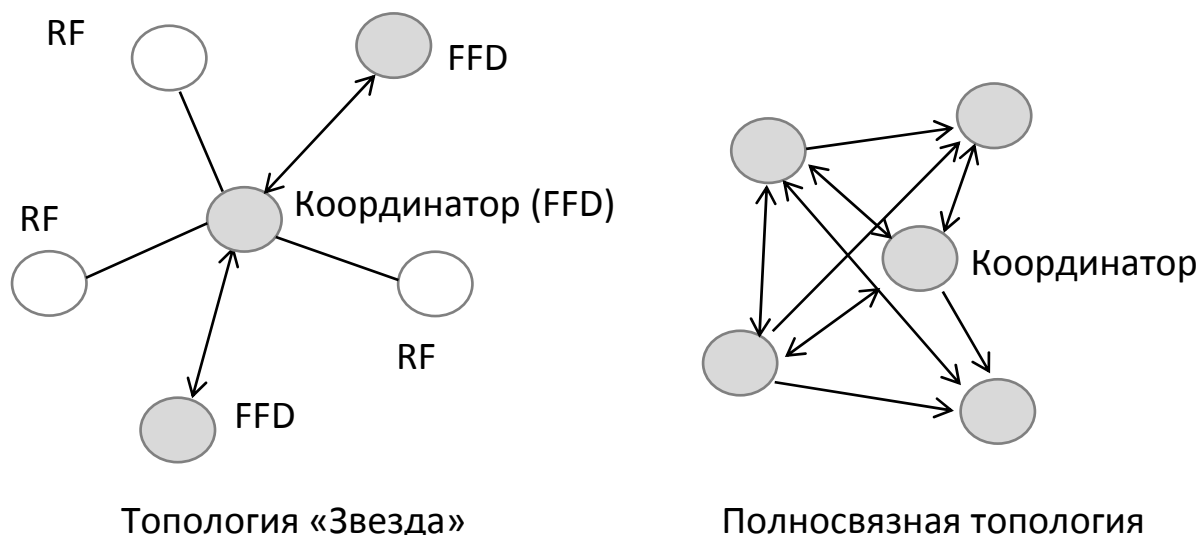


Рисунок 1.8 – Варианты топологии сетей ZigBee

Каждое устройство сети имеет 64-битный адрес. Пикосети ZigBee могут взаимодействовать друг с другом. Как и в сетях стандарта 802.15.3 информационный обмен в ZigBee происходит посредством последовательности суперфреймов. Структура суперфрейма представлена на рисунке 1.9.

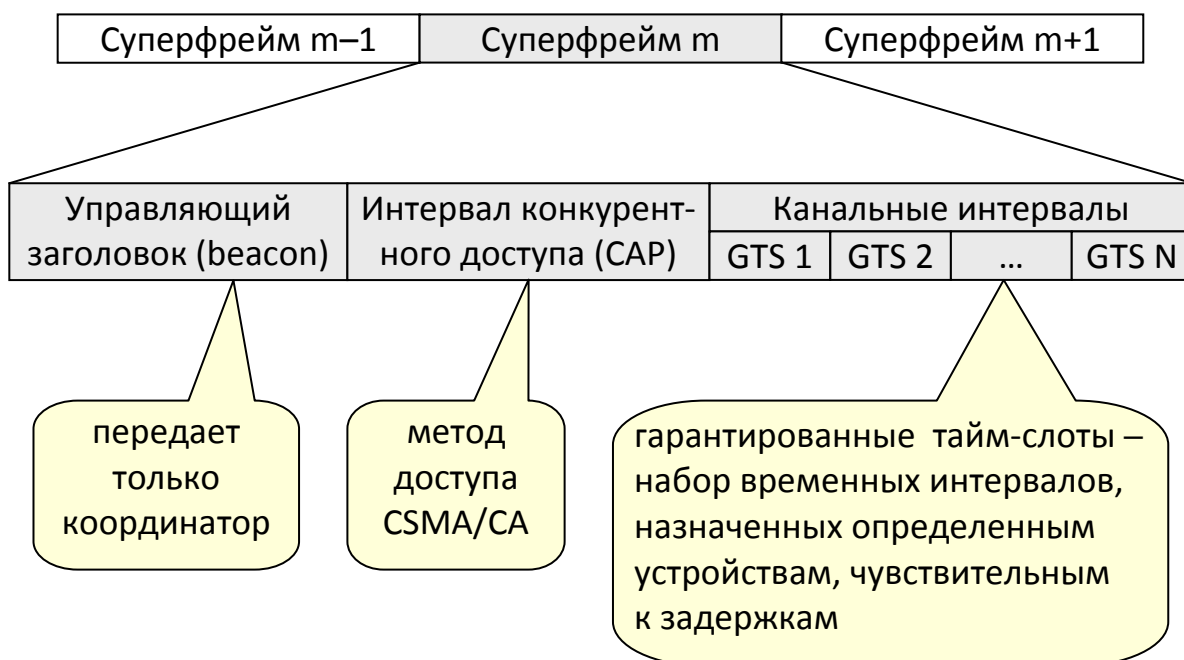


Рис. 1.9 – Структура суперфрейма сети 802.15.4

Как показано на рисунке, структура суперфреймов сетей 802.15.3 и 802.15.4 совпадают, т.е. информационный обмен происходит по одному и тому же сценарию.

В суперфрейме может не быть ни управляющего сегмента (beacon), ни гарантированных тайм-слотов (GTS). Если трафик в пикосети невелик, в централизованном управлении нет необходимости. В этом случае алгоритм доступа CSMA/CA достаточно эффективен.

Зачем нужен ZigBee? Главным образом эта технология ориентирована на использование в качестве средства связи между автономными приборами и оборудованием. Например, складские, охранные, медицинские системы, датчики, сенсоры и т.д.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Чем отличается Bluetooth от IEEE 802.15.1?
2. Какой метод расширения спектра используется в технологии HomeRF?
3. Какой метод доступа к среде передачи используется на интервале конкурентного доступа в сетях 802.15.3 и 802.15.4?
4. Сколько активных устройств может быть в сети Bluetooth?
5. Из каких элементов состоит суперфрейм?
6. Что означает FEC 1/3?
7. Какие особенности передачи данных в канале SCO?
8. Какой диапазон частот называют ISM?
9. Сколько тайм-слотов может занимать кадр Bluetooth?
10. Как обеспечивается надежность передачи асинхронных данных в сетях Bluetooth?

## 2. Кодирование и мультиплексирование данных

### 2.1. Методы передачи дискретных данных на физическом уровне

При передаче дискретных данных по каналам связи применяется 2 основных типа физического кодирования:

- на основе синусоидального несущего сигнала (называется **модуляцией** или **аналоговым модуляцией**);
- на основе последовательности прямоугольных импульсов (называют **цифровым кодированием**).

Эти способы отличаются шириной спектра результирующего сигнала и сложностью аппаратуры, необходимой для реализации. Для реализации синусоидальной модуляции требуется более дорогая и более сложная аппаратура.

При использовании прямоугольных импульсов спектр результирующего сигнала получается весьма широким (спектр идеального импульса имеет бесконечную ширину). Применение синусоиды приводит к спектру гораздо меньшей ширины при той же скорости передачи информации.

Очень часто данные, изначально имеющие аналоговую форму (например, речь) передаются по каналам связи в дискретном виде, т.е. в виде последовательности нулей и единиц. Процесс представления аналоговой информации в дискретной форме называется **дискретной модуляцией**.

### 2.2. Модуляция при передаче аналоговых сигналов

Исторически модуляция начала применяться для аналоговой информации и только потом для дискретной. Необходимость в модуляции аналоговой информации возникает, когда нужно передать низкочастотный аналоговый сигнал через канал, находящийся в высокочастотной области спектра.

Пример – передача голоса по радио. Голос имеет спектр шириной  $\approx 10$  кГц, а радиодиапазоны – гораздо более высокие частоты 30 кГц ... 300 МГц, следовательно, непосредственно голос через такую среду передать нельзя.

Для решения проблемы амплитуду высокочастотного **несущего сигнала** изменяют (**модулируют**) в соответствии с изменением низкочастотного голосового сигнала (рис. 2.1). При этом спектр результирующего сигнала попадает в нужный высокочастотный диапазон (рис. 2.2). Такой тип модуляции называется **амплитудной модуляцией** (AM – Amplitude Modulation).

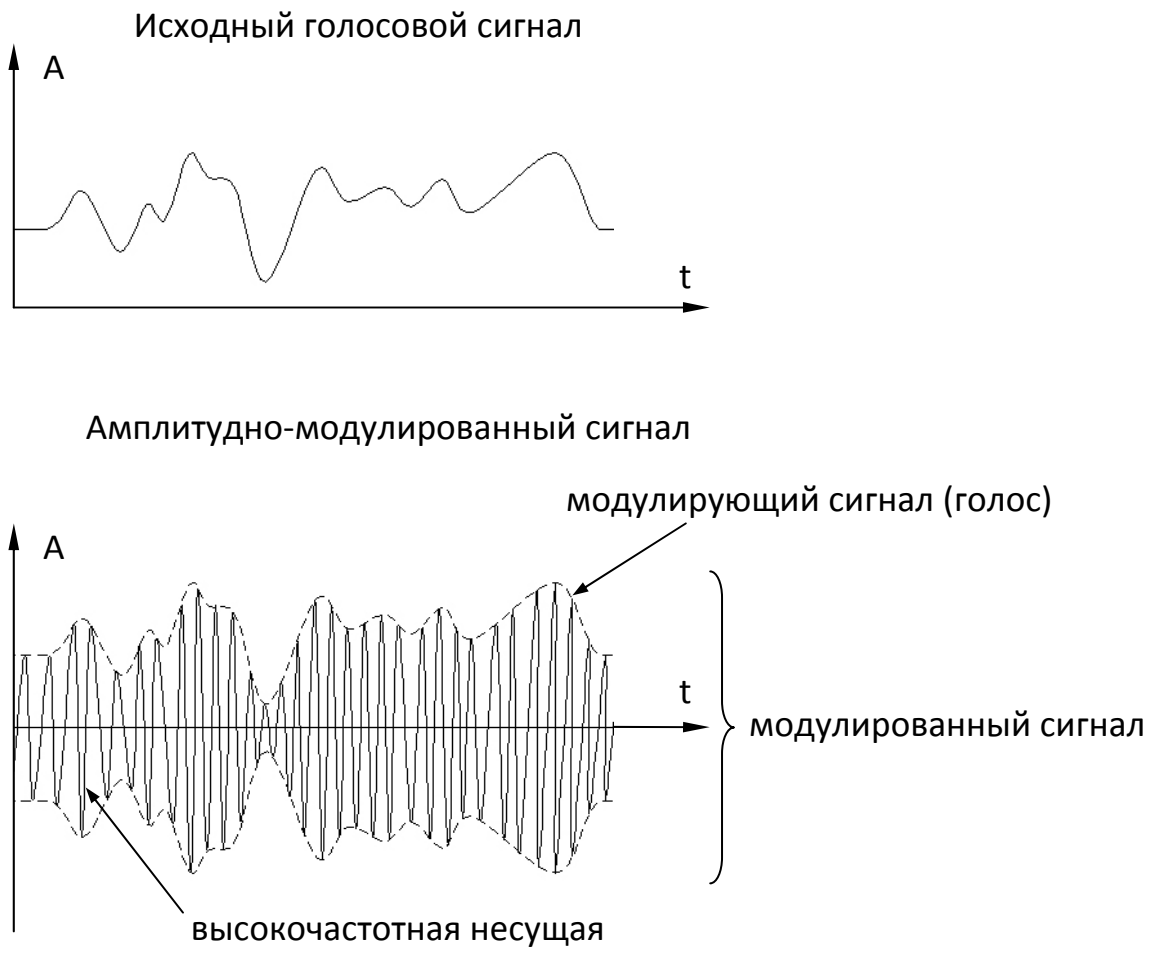


Рисунок 2.1 – Амплитудная модуляция

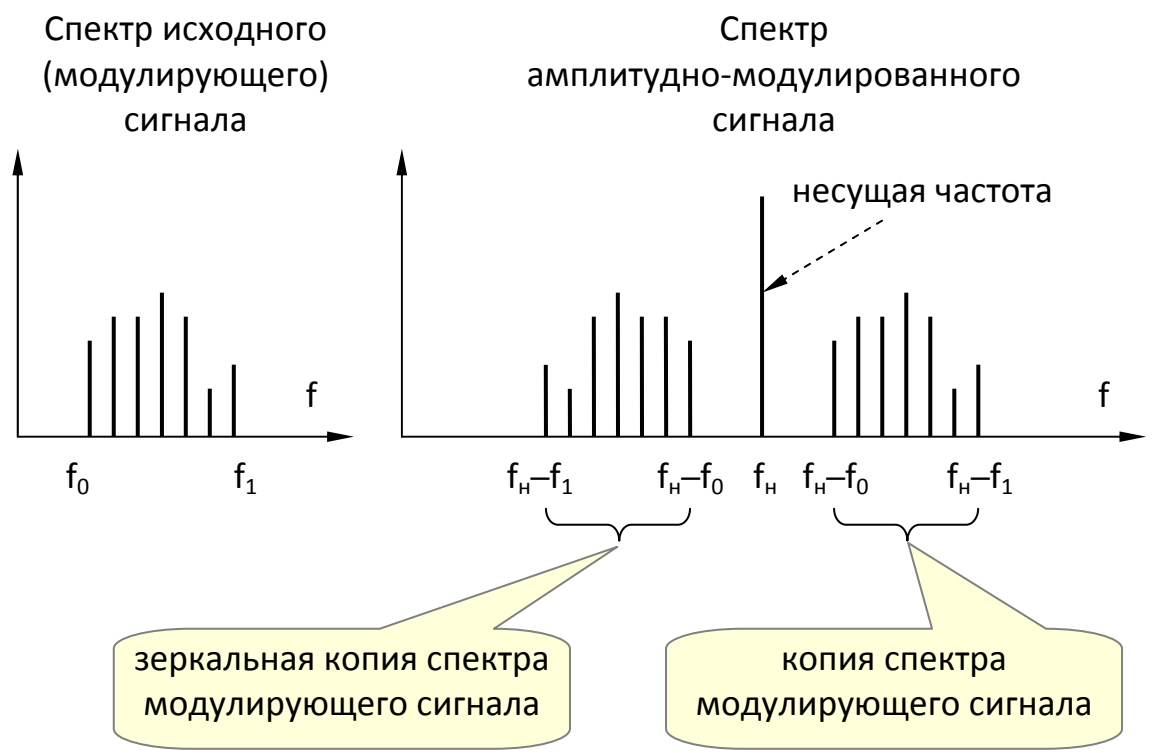


Рисунок 2.2 – Спектр амплитудно-модулированного сигнала

### 2.3. Модуляция при передаче дискретных сигналов

При передаче дискретной информации посредством модуляции единицы и нули кодируются изменением **амплитуды**, **частоты** или **начальной фазы** несущего синусоидального сигнала. В случае, когда модулированные сигналы передают дискретную информацию, вместо термина «модуляция» часто используют термин «манипуляция»:

- амплитудная манипуляция (ASK – Amplitude Shift Keying);
- частотная манипуляция (FSK – Frequency Shift Keying);
- фазовая манипуляция (PSC – Phase Shift Keying).

Самый типичный пример применения модуляции при передаче дискретной информации – это передача компьютерных данных по телефонным каналам.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) стандартного абонентского канала – **канала тональной частоты** представлена на рисунке 2.3.

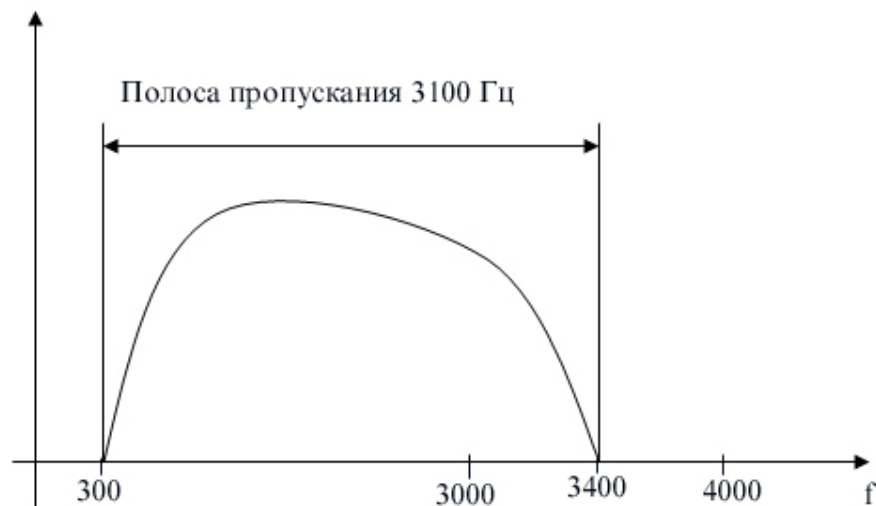


Рисунок 2.3 – АЧХ канала тональной частоты

Такая узкая полоса пропускания (3100 Гц) вполне достаточна для качественной передачи голоса, но для передачи прямоугольных импульсов ее недостаточно. Аналоговая модуляция позволяет решить эту проблему. Устройство, которое выполняет функцию **модуляции** текущей синусоиды (при передаче) и **демодуляции** (при приеме), называется **модемом** (модулятор-демодулятор).

На рисунке 2.4 показаны различные типы модуляции (манипуляции), применяемые для передачи дискретной информации.



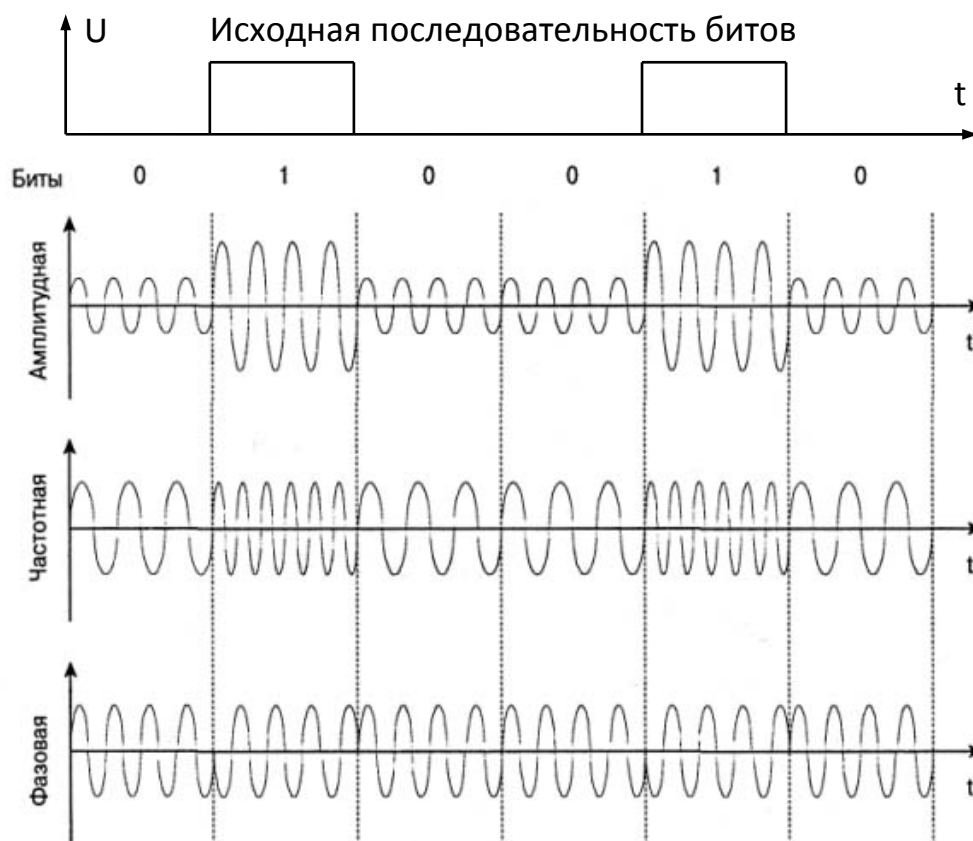


Рисунок 2.4 – Типы модуляции (манипуляции)

Амплитудная манипуляция (ASK) редко используется на практике в чистом виде из-за низкой помехоустойчивости, но часто применяется в сочетании с фазовой. При использовании только двух состояний сигнала (амплитуды, частоты или фазы) за один такт передается один бит информации, поэтому говорят:

- двоичная частотная манипуляция (Binary FSK, BFSK);
- двоичная фазовая манипуляция (Binary PSK, BPSK).

Если применяются 4 разные частоты или 4 фазы ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ), тогда говорят:

- четырехуровневая (четырёхпозиционная) частотная манипуляция (Four Level FSK);
- квадратурная фазовая манипуляция (Quadrature PSK, QPSK).

Из комбинированных методов манипуляции наиболее распространенными являются методы **квадратурной амплитудной модуляции** (Quadrature Amplitude Modulation, QAM). Эти методы сочетают фазовую и амплитудную модуляцию.

## 2.4. Спектр модулированного сигнала

Спектр результирующего модулированного сигнала зависит от типа модуляции и скорости модуляции, т.е. желаемой скорости передачи битов исходной информации.

Рассмотрим сначала спектр сигнала при потенциальном кодировании. Пусть логическая единица кодируется положительным потенциалом, а логический ноль – отрицательным потенциалом той же величины.

Для упрощения предположим, что передается информация, состоящая из бесконечной последовательности чередующихся «0» и «1» (рис. 2.5).

Определим следующие понятия:

- Частота следования:  $F_{и} = 1 / T_{и}$
- Сквозность импульсов:  $Q = T_{и} / t_{и}$
- Битовая скорость:  $N = 1 / t_{и}$

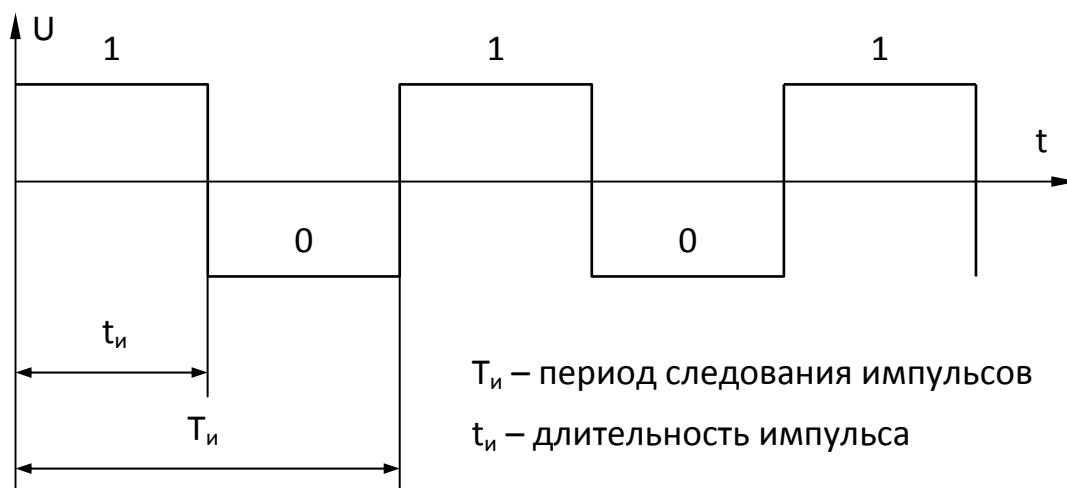


Рисунок 2.5 – Периодическая последовательность импульсов

Периодическую последовательность импульсов, являющуюся несинусоидальным колебанием, согласно теореме Фурье, можно представить тригонометрическим рядом. Этот ряд состоит из бесконечного числа гармонических составляющих с определенными частотами и амплитудами:

$$4/\pi \{ \sin 2\pi \cdot F_{и} \cdot t + 1/3 (\sin 2\pi \cdot 3F_{и} \cdot t) + 1/5 (\sin 2\pi \cdot 5F_{и} \cdot t) + 1/7 (\sin 2\pi \cdot 7F_{и} \cdot t) + \dots \}$$

Таким образом, если функция, представляет собой последовательность прямоугольных импульсов, она раскладывается в ряд, состоящий из бесконечного количества гармоник с частотами (рис. 2.6):

$$F_{и}, 3F_{и}, 5F_{и}, 7F_{и}, \dots, \text{ где } F_{и} = 1/T_{и}.$$

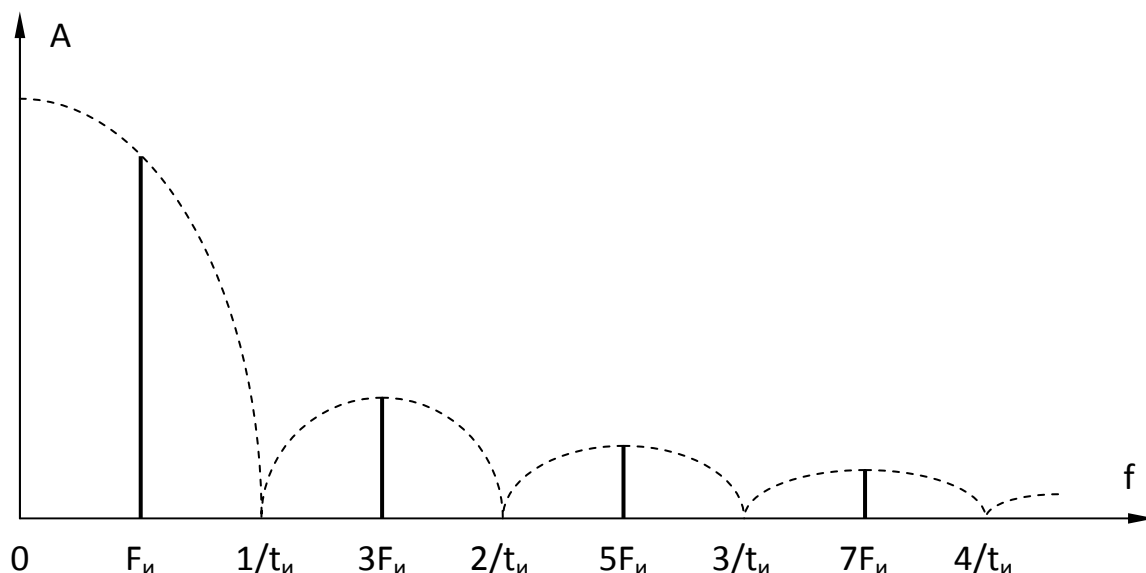


Рисунок 2.6 – Спектр последовательности прямоугольных импульсов

Амплитуды этих гармоник медленно убывают с коэффициентами  $1/3$ ,  $1/5$ ,  $1/7$ , ... от амплитуды гармоники  $F_n$ .

Такой спектр называют линейчатым, а на рисунке через вершины спектральных линий проведена огибающая.

На самом деле спектр сигнала постоянно меняется в зависимости от того, какие данные передаются. Например, при передаче длинных последовательностей единиц или нулей, спектр сдвигается в сторону низких частот, а если передаваемые данные состоят только из единиц (или только из нулей), спектр состоит из гармоники нулевой частоты.

Интервал между спектральными линиями (в общем случае) равен  $1/T_n$ , поэтому при увеличении  $T_n$  (и неизменном  $t_n$ ) увеличивается количество спектральных линий. На рисунке 2.7 представлен спектр, соответствующий последовательности прямоугольных импульсов, передаваемых со скважностью  $Q=3$ .

Рисунки 2.6 и 2.7 показывают, что форма огибающей при увеличении скважности остается неизменной, а ширина «лепестков» спектра зависит только от длительности импульса  $t_n$ . Если увеличить время передачи импульса, например, в 2 раза, т.е. уменьшить битовую скорость в 2 раза, это приведет к сужению спектра 2 раза.

Таким образом, ширина спектра результирующего сигнала при передаче последовательности прямоугольных импульсов прямо пропорциональна битовой скорости.

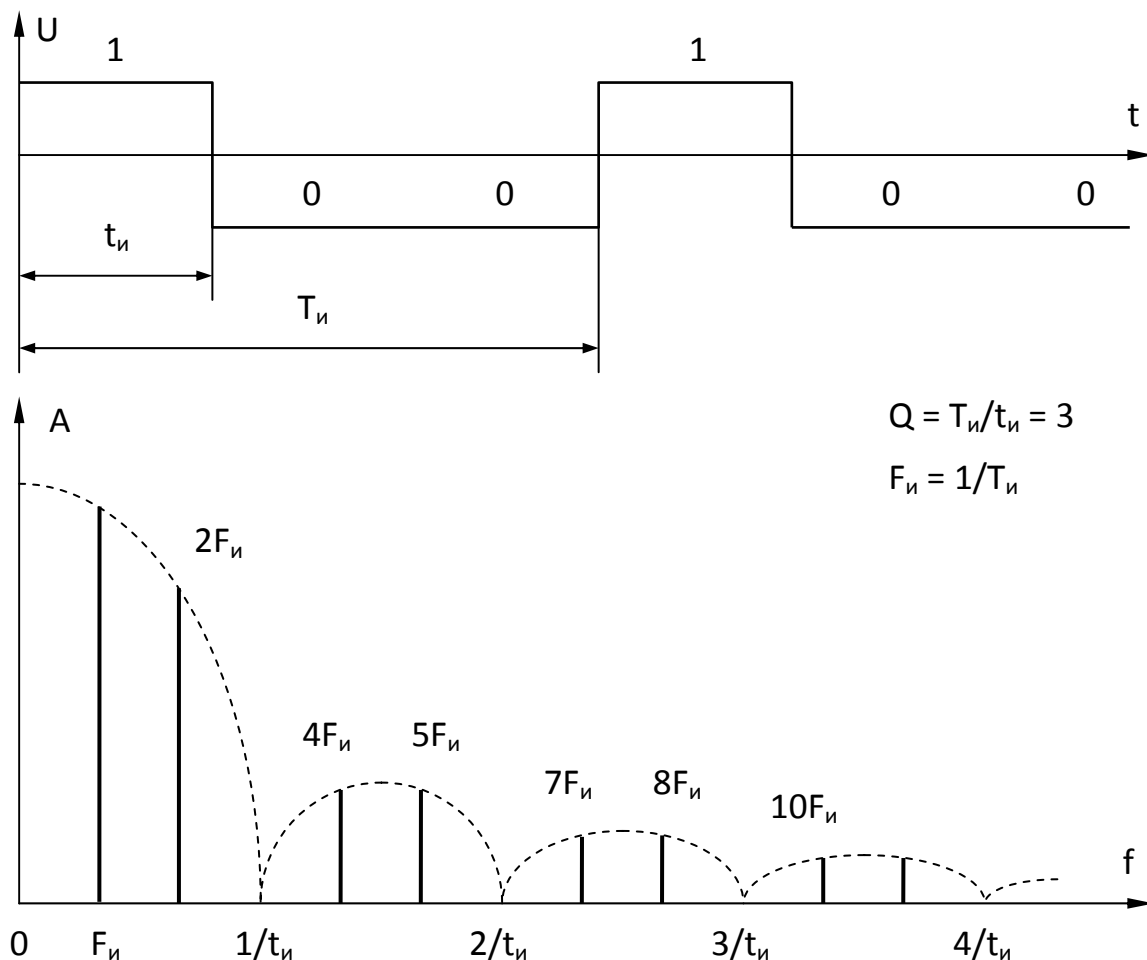


Рисунок 2.7 – Спектр последовательности прямоугольных импульсов при  $Q=3$

Спектр сигнала при амплитудной модуляции (манипуляции)

Итак, модулирующий сигнал – прямоугольные импульсы, передаваемые со скоростью  $1/t_n$  (рис. 2.8а). Несущий сигнал – синусоида с частотой  $f_n$  (рис. 2.8б).

При амплитудной манипуляции (АМн) в спектре модулированных колебаний справа от несущей частоты располагается боковая полоса, соответствующая спектру модулирующего сигнала, а слева от несущей – зеркальная копия спектра модулирующего сигнала (рис. 2.8 в).

Теоретически спектр модулированного сигнала бесконечно широкий. Однако если принять меры по ограничению спектра модулированного сигнала, то можно добиться того, что его ширина составит:

$$\Delta F \approx 2/t_n.$$

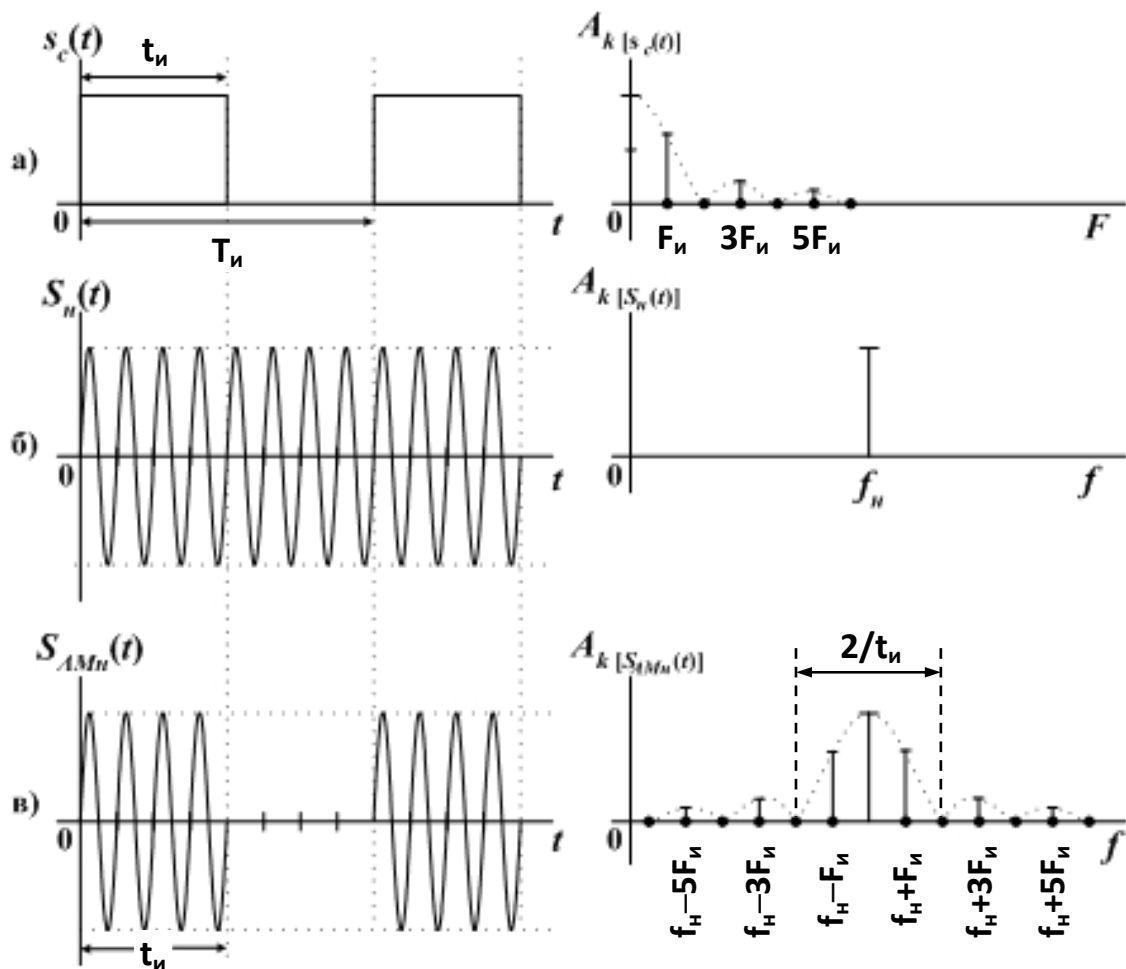


Рисунок 2.8 – Временные и спектральные характеристики амплитудно-манипулированного сигнала

Вообще говоря, существует теоретический предел – максимально возможная пропускная способность канала связи при заданной ширине полосы пропускания. Это так называемый «барьер Найквиста»:

$$C = 2 \cdot \Delta F \cdot \log_2 M,$$

где  $C$  – максимальная пропускная способность канала (бит/с),

$\Delta F$  – ширина полосы пропускания канала (Гц),

$M$  – количество различных состояний информационного параметра.

Если сигнал имеет два различных состояния, то пропускная способность равна удвоенному значению ширины полосы пропускания. Например, чтобы передавать со скоростью 2 бит/с, нужна полоса 1 Гц, чтобы передавать со скоростью 2 Мбит/с, нужна полоса 1 МГц и т.д.

Если используется более чем два уровня сигнала, то пропускная способность повышается, поскольку в одном символе можно передавать несколько битов исходных данных. Например, можно передавать в одном сим-

воле 2 бита, если использовать четыре уровня сигнала, или 3 бита, если использовать 8 уровней сигнала и т.д.

Формула Найквиста определяет предельную скорость передачи данных, когда задана полоса и количество позиций модуляции. На практике достичь его невозможно, но достаточно простыми средствами можно добиться 30% – 50% от «барьера Найквиста».

### Спектр сигнала при частотной манипуляции

При частотной манипуляции (ЧМн) частота высокочастотного колебания изменяется скачком на величину  $\pm\Delta f_m$  относительно несущей (средней) частоты  $f_{cp}$  (рис. 2.9).

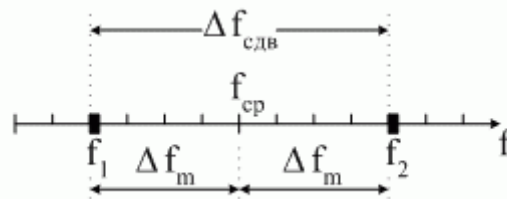


Рисунок 2.9 – Параметры сигналов при частотной манипуляции

Таким образом, на выходе модулятора вырабатываются колебания на частотах  $f_2$  и  $f_1$ . Разность частот  $\Delta f_{сдв} = |f_2 - f_1|$  называют **частотным сдвигом**. Максимальное отклонение частоты  $\Delta f_m$  от несущей называют **девиацией**. Величину  $m_{чм} = \Delta f_{сдв} \cdot t_{и}$  называют **индексом частотной манипуляции**.

Различают частотную манипуляцию с разрывом фазы и без разрыва фазы. ЧМн сигнал с разрывом фазы можно представить в виде суммы двух АМн сигналов с разными несущими частотами  $f_1$  и  $f_2$  (рис. 2.10).

Представленный на рисунке 2.10 спектр ЧМн сигнала трудно назвать компактным, ведь он шире спектра амплитудно-манипулированного (АМн) сигнала на величину частотного сдвига  $\Delta f_{сдв} = |f_2 - f_1|$ . Поэтому на практике стремятся уменьшить индекс манипуляции, а также избежать разрыва фазы (рис. 2.11), что позволяет существенно уменьшить боковые лепестки спектра.

Наибольшей спектральной эффективностью и достаточно высокой помехозащищенностью обладает частотная манипуляция с минимальным сдвигом, называемая также **минимальной частотной манипуляцией** (MSK – Minimum Shift Keying). При использовании MSK значения частот, соответствующих логическим «0» и «1», отличается на величину, равную половине скорости передачи данных, т.е. индекс модуляции  $m_{чм} = 0,5$ .

Ширина спектра определяется по общей формуле:

$$\Delta F = (m_{чм} + 2)/t_{и}.$$

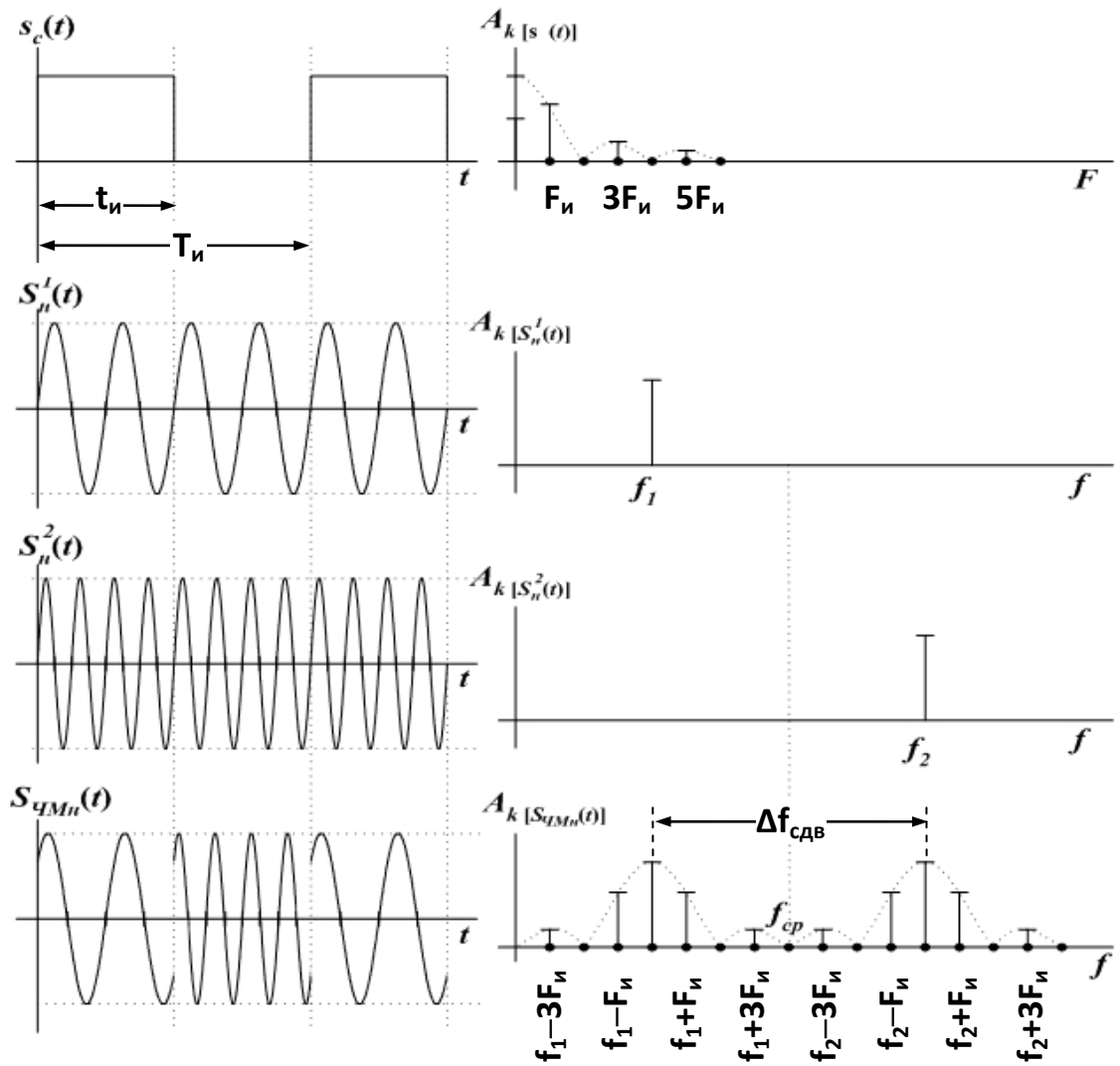


Рисунок 2.10 – Временные и спектральные характеристики частотно-манипулированного сигнала с разрывом фазы

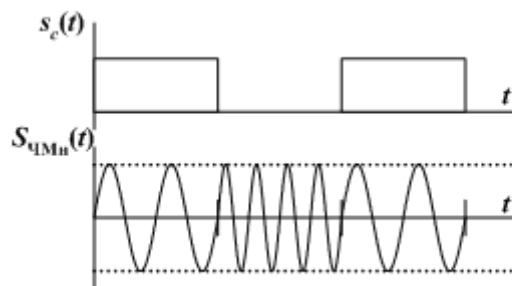


Рисунок 2.11 – Временные характеристики частотно-манипулированных колебаний без разрыва фазы

Следовательно, при минимальной манипуляции

$$\Delta F = 2,5 / t_n,$$

т.е. на четверть шире, чем при АМн (рис. 2.12).

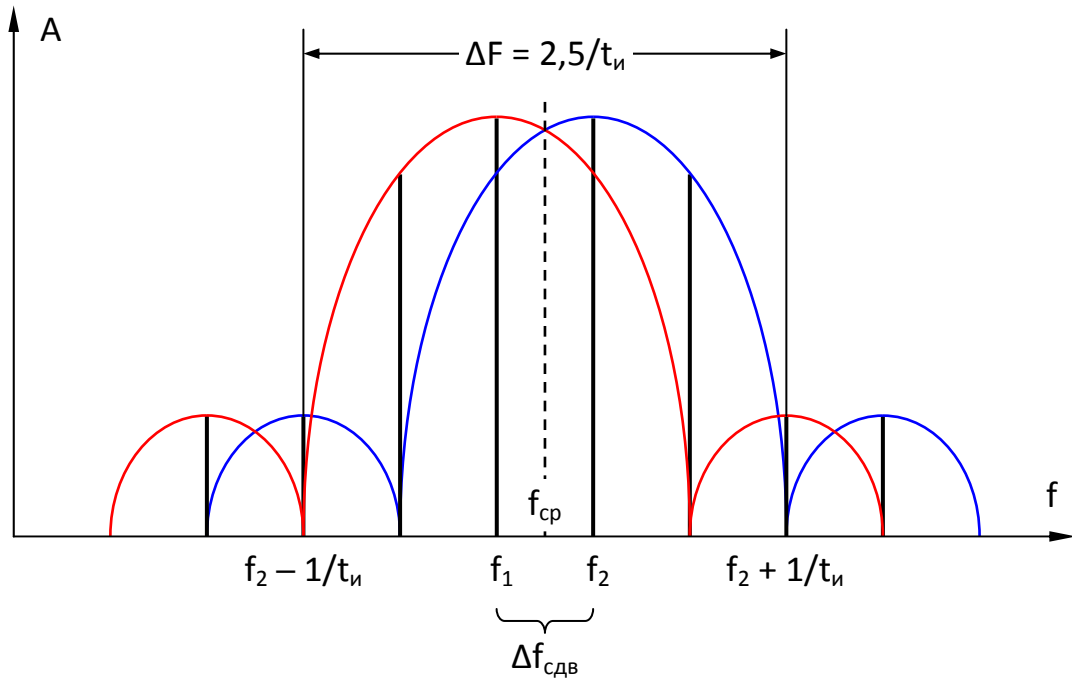


Рисунок 2.12 – Спектральные характеристики минимальной манипуляции

### Спектр сигнала при фазовой манипуляции

Наиболее простой вариант – бинарная фазовая манипуляция (ФМн), при которой изменение фазы несущего колебания происходит скачком в определенные моменты модулирующего сигнала на  $0^\circ$  или  $180^\circ$ , при этом амплитуда и частота несущий не меняются (рис. 2.13).

Из рисунка видно, что спектр амплитуд ФМн сигнала содержит те же составляющие, что и АМн сигнала, а для скважности  $Q = T_{и}/t_{и} = 2$  составляющая на несущий частоте отсутствует.

При  $\Delta\varphi = \pi$  ( $180^\circ$ ) вся энергия сигнала содержится только в боковых полосах, причем амплитуда боковых составляющих ФМн сигнала в  $\approx 2$  раза больше, чем у АМн сигнала. Это обеспечивает более высокую помехозащищенность.

Ширина спектра ФМн сигнала такая же, как и у АМн сигнала:

$$\Delta F = 2/t_{и}.$$

Вместе с тем у ФМн есть существенный недостаток: неопределенность начальной фазы. Дело в том, что в канале связи к переданной фазе доставляется произвольный и неизвестный фазовый сдвиг, кроме того, фаза сигнала всегда приводится к интервалу  $2\pi$ , следовательно, сигналы, различающиеся по фазе по фазе на  $2\pi$ , для приемника одинаковы. Это характерно только для ФМн. Данная неоднозначность решается использованием относительно-фазовой манипуляции (ОФМн). У такого метода манипуляции информация



заложена не в абсолютных значениях начальной фазы, а в разности начальных фаз соседних символов.

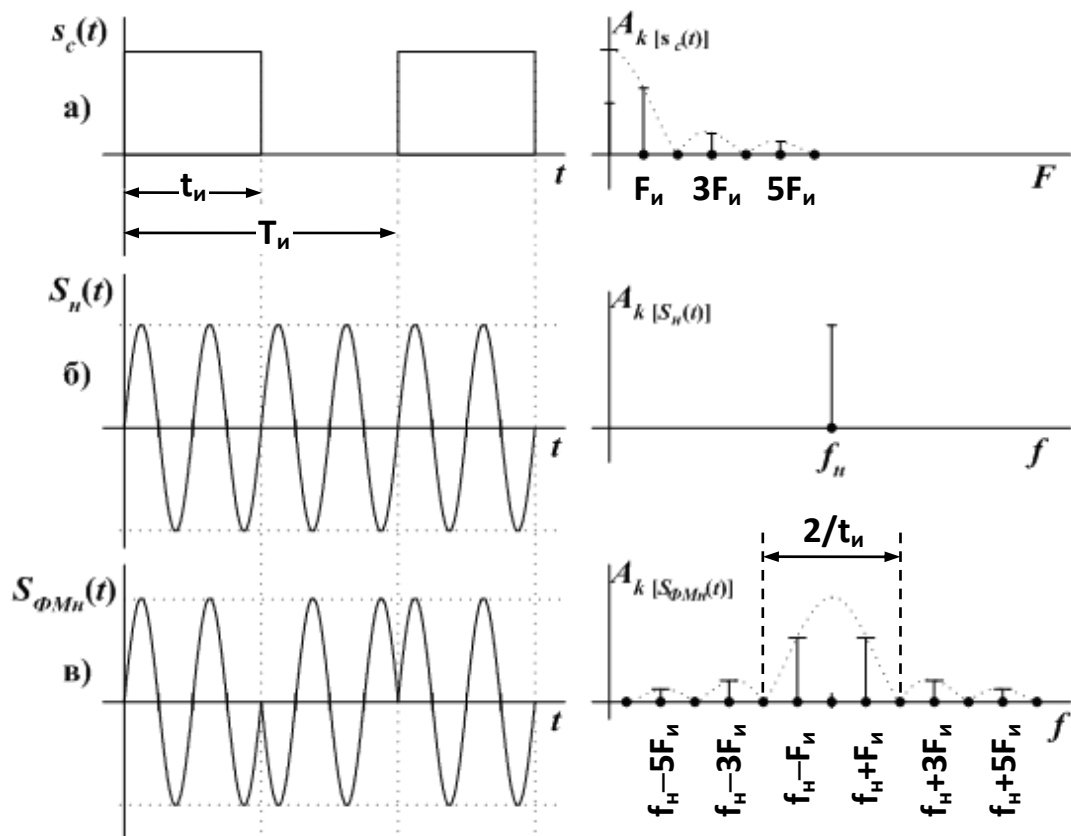


Рисунок 2.13 – Временные и спектральные характеристики сигнала с фазовой манипуляцией

Эта неоднозначность решается использованием относительно-фазовой манипуляции (ОФМн). У такого метода манипуляции информация заложена не в абсолютных значениях начальной фазы, а в разности начальных фаз соседних символов.

В радиоаппаратуре беспроводных сетей передачи данных используются следующие варианты фазовой манипуляции:

- бинарная – BPSK (1 бит на символ);
- квадратурная – QPSK (2 бита на символ);
- восьми позиционная – 8-PSK (3 бита на символ).

Таким образом, для передачи информации в беспроводных сетях используются различные методы модуляции (манипуляции) несущего синусоидального сигнала:

- амплитудная манипуляция (АМн, ASK), когда информационным параметром является амплитуда несущего сигнала (в чистом виде не используется, используется совместно с фазовой манипуляцией);

- частотная манипуляция (ЧМн, FSK), когда информационным параметром является частота несущего сигнала;
- фазовая манипуляция (ФМн, PSK), когда информационным параметром является начальная фаза несущего сигнала.

Исследования спектральных характеристик модулированных сигналов показали, что ширина спектра при любом методе манипуляции составляет:

$$\Delta F \approx 2/t_{и},$$

где  $t_{и}$  – время передачи одного символа.

Учитывая, что символьная скорость обратно пропорциональна времени передачи одного символа ( $N = 1/t_{и}$ ), ширина спектра модулированного сигнала:

$$\Delta F \approx 2N.$$

### **Вопросы для самопроверки:**

1. Что такое «скважность» импульсов?
2. Какое количество бит можно передать в одном символе, если использовать 8-позиционную фазовую модуляцию?
3. Как связаны спектры модулирующего и модулированного сигнала?
4. Что такое барьер Найквиста?
5. В чем сущность минимальной манипуляции?
6. Какая связь между символьной скоростью и шириной спектра модулированного сигнала?
7. Какой вид манипуляции обеспечивает наибольшую помехозащищенность?

### 3. Локальные беспроводные сети

#### 3.1. Стандарт IEEE 802.11

В 1997 г. комитетом IEEE 802 был принят стандарт, который определял функции уровня (подуровня) MAC и три варианта физического уровня, которые обеспечивали передачу данных со скоростями 1 и 2 Мбит/с:

1. Средой является ИК волны диапазона 850 нм (1 нм – это 1 миллиардная часть метра,  $1\text{ нм} = 0,000\ 000\ 001\text{ м} = 1 \cdot 10^{-9}\text{ м}$ ), которые генерируются либо полупроводниковым лазерным диодом, либо светодиодом (LED).

Для передачи сигнала может использоваться:

- ненаправленная антенна;
- отражение от потолка;
- фокусное направленное излучение.

Область покрытия ограничивается прямой видимостью, поскольку ИК волны не проникают через стены.

2. Передающая среда – микроволновый диапазон ISM (2,4...2,4835 ГГц). Этот вариант основывается на методе FHSS (метод частотных скачков). Каждый узкий канал имеет ширину 1 МГц. Частотная манипуляция (FSK) с двумя состояниями (частотами) обеспечивает скорость 1 Мбит/с, а с четырьмя состояниями – 2 Мбит/с. Количество каналов и частота скачков настраиваются.
3. Тот же диапазон ISM. Используются метод DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum – расширение спектра методом прямой последовательности), где в качестве последовательности чипов применяется 11-битный код Баркера (11100010010). Каждый бит последовательности (чип) кодируется путем двоичной фазовой манипуляции (BPSK), что обеспечивает скорость 1 Мбит/с, или квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) – скорость 2 Мбит/с.

#### Сущность метода DSSS

В методе DSSS каждый информационный бит заменяется N битами, поэтому тактовая скорость передачи сигналов увеличивается в N раз. А это означает, что в N раз расширяется и спектр сигналов. Цель кодирования методом DSSS та же, что и в методе FHSS – повышение помехоустойчивости. Код, которым заменяется двоичная единица исходной информации, называется **расширяющей последовательностью**, а каждый бит такой последовательности – **чипом**. Скорость передачи результирующего кода называют **чи-**

**повой скоростью.** Двоичный ноль кодируется инверсным значением расширяющей последовательности. Приемник знает расширяющую последовательность, чтобы понять принимаемую информацию.

Для кодирования битов результирующего кода может использоваться любой вид модуляции, например, BPSK.

Ранее была выявлена зависимость ширины спектра модулированного сигнала от времени передачи символа (рис. 3.1).

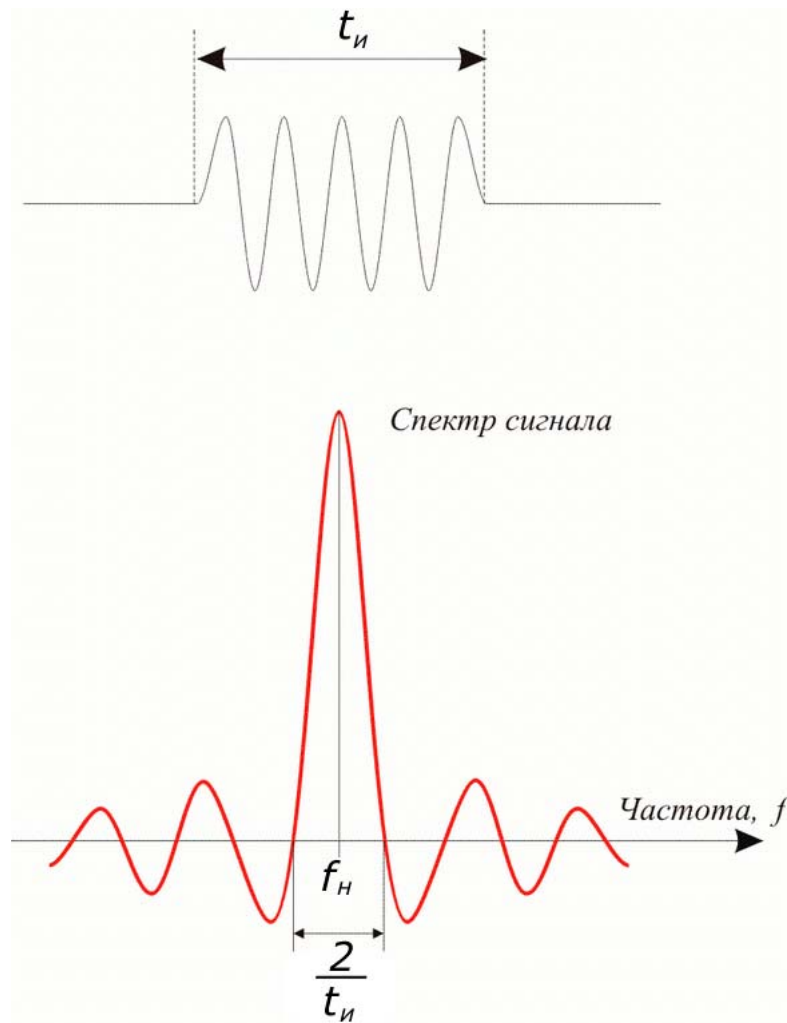


Рисунок 3.1 – Спектр модулированного сигнала

Если битовая скорость составляет 1 Мбит/с, то ширина спектра модулированного сигнала  $\sim 2$  МГц. Следовательно, если представить информационный бит последовательностью из 11 чипов (более частых импульсов), то спектр результирующего сигнала расширится в 11 раз (поскольку чиповая скорость составит 11 Мчип/с).

Одновременно с расширением спектра уменьшается и спектральная плотность энергии, так как энергия «размазывается» по всему спектру, а результирующий сигнал становится «шумоподобным» (рис. 3.2).

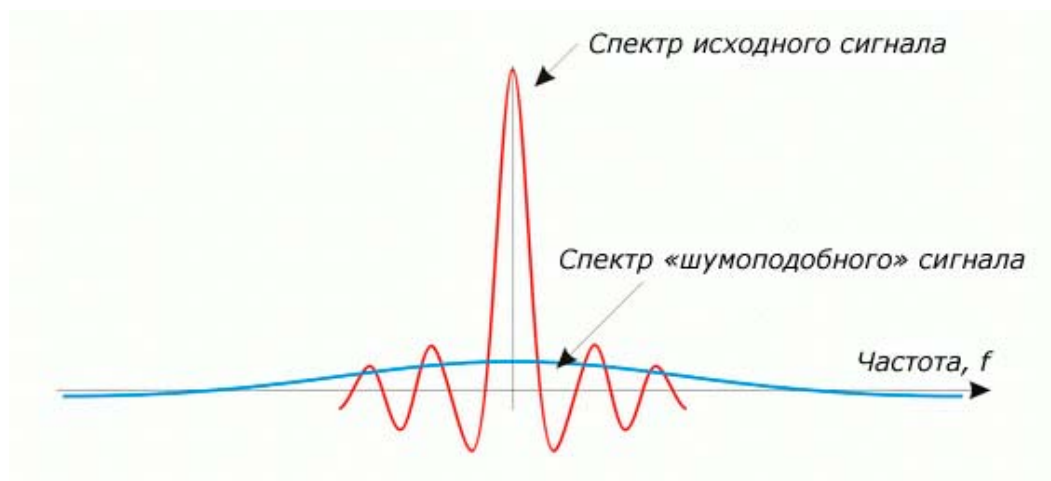


Рисунок 3.2 – Спектры исходного и шумоподобного сигналов

Алгоритм получения последовательности чипов из исходных информационных битов представлен на рисунке 3.3.

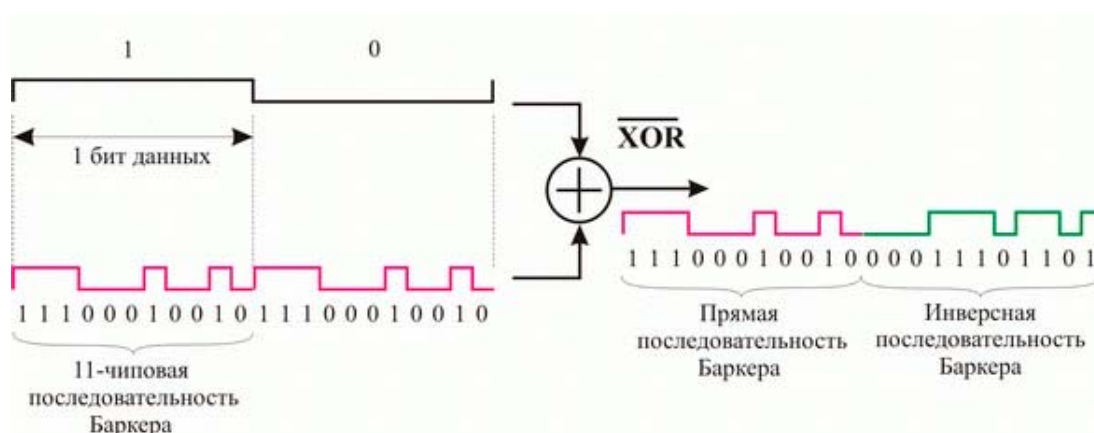


Рисунок 3.3 – Использование кода Баркера для получения последовательности чипов

Возникает вопрос: для чего усложнять первоначальный сигнал, если в результате он становится неотличимым от шума? Дело в том, что кодовые последовательности чипов обладают уникальным свойством автокорреляции. Под термином **корреляция** в математике понимают степень взаимоподобия двух функций, то есть насколько две различные функции похожи друг на друга. Под **автокорреляцией** понимается степень подобия функции самой себе в различные моменты времени. Например, если некоторая функция зависит (меняется) от времени и эта зависимость выражается в виде  $f(t)$ , то можно рассмотреть функцию в некоторый момент времени  $t_0$  и в момент времени  $t_0 + \tau$ . Степень соответствия этих двух функций друг другу в различные моменты времени и называется автокорреляцией. Можно подобрать такую последовательность чипов, для которой функция автокорреляции будет иметь резко выраженный пик лишь для одного значения сдвига  $\tau = 0$ . Таким

образом, функция будет подобна самой себе только при нулевом значении сдвига и совсем не похожа на себя при любом другом значении сдвига.

Одной из наиболее известных таких последовательностей является код Баркера длиной в 11 чипов: 11100010010. Коды Баркера обладают наилучшими среди известных псевдослучайных последовательностей свойствами шумоподобности, что и обусловило их широкое применение. Надо заметить, что последовательности Баркера могут быть разной длины: 3, 4, 5, 7, 11, 13 чипов (Таблица 3.1), однако в стандарте 802.11 используется именно 11-чиповая последовательность.

Таблица 3.1 – Последовательности Баркера разной длины

Длина	Последовательность Баркера
3	110
4	1110 или 1101
5	11101
7	1110010
11	11100010010
13	1111100110101

Приемник поочередно «сравнивает» полученные биты информации с образцом последовательности Баркера. Для этого полученный сигнал умножается на последовательность Баркера, т.е. вычисляется автокорреляционная функция сигнала.

Продемонстрируем работу приемника и проверим корреляционные свойства кодов Баркера.

Предположим, один из узлов сети собирается передать несколько бит информации, например, 110. Передатчик заменяет каждый информационный бит кодом Баркера («0» заменяется инверсным кодом). В результате, в эфир будет передана следующая последовательность битов (чипов):

111000100101110001001000011101101

Приемник получает эти данные. В их составе нет дополнительных битов синхронизации, а некоторые биты (чипы) могли быть приняты с ошибками. Приемнику придется самому решать задачи синхронизации и исправления ошибок.

Чтобы постоянно не умножать на «0», в принятом коде и в образце последовательности Баркера заменим «1» на «-1», «0» на «1». Теперь будем побитно умножать «образцовую» последовательность Баркера на полученный приемником код и складывать эти произведения (разумеется, с учетом

знаков). Потом будем сдвигать «образец» на один чип и повторять вычисления.

$$\begin{array}{r} -1-1-1 \ 1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1-1 \ 1-1-1-1 \ 1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1-1-1-1 \ 1-1-1 \ 1-1 \\ -1-1-1 \ 1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \end{array}$$

---


$$1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \quad \Sigma = 11 \text{ (сдвиг} = 0)$$

$$\begin{array}{r} -1-1-1 \ 1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1-1 \ 1-1-1-1 \ 1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1-1-1-1 \ 1-1-1 \ 1-1 \\ -1-1-1 \ 1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \end{array}$$

---


$$1 \ 1-1 \ 1 \ 1-1-1 \ 1-1-1-1 \quad \Sigma = -1 \text{ (сдвиг} = 1)$$

$$\begin{array}{r} -1-1-1 \ 1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1-1 \ 1-1-1-1 \ 1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1-1-1-1 \ 1-1-1 \ 1-1 \\ -1-1-1 \ 1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \end{array}$$

---


$$1-1-1 \ 1-1 \ 1-1-1 \ 1 \ 1-1 \quad \Sigma = -1 \text{ (сдвиг} = 2)$$

$$\begin{array}{r} -1-1-1 \ 1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1-1 \ 1-1-1-1 \ 1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1-1-1-1 \ 1-1-1 \ 1-1 \\ -1-1-1 \ 1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \ 1-1 \ 1 \end{array}$$

---


$$-1-1-1-1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1-1 \ 1-1 \quad \Sigma = -1 \text{ (сдвиг} = 3)$$

Если продолжить эксперимент можно убедиться, что при любом сдвиге, отличном от нуля, корреляционная функция будет принимать значения 1 или -1. Если коррелятор вычисляет сумму, равную 11 или -11, это означает нулевой сдвиг и полное совпадение с переданной «1» (когда  $\Sigma = 11$ ) или «0» (когда  $\Sigma = -11$ ).

Хорошие автокорреляционные свойства кодов Баркера позволяют правильно интерпретировать данные даже при искажении нескольких битов.

Итак, при использовании метода DSSS с 11-чиповыми кодами Баркера ширина спектра сигнала составляет:

$$2 \cdot 11 \text{ МГц} = 22 \text{ МГц.}$$

Учитывая, что ширина всего частотного диапазона ISM составляет всего 83,5 МГц, в нем можно уместить только 3 неперекрывающихся частотных канала. Вообще весь диапазон разделен на 11 перекрывающихся каналов шириной 22 МГц (рис. 3.4). Неперекрывающимися являются каналы 1, 6 и 11.

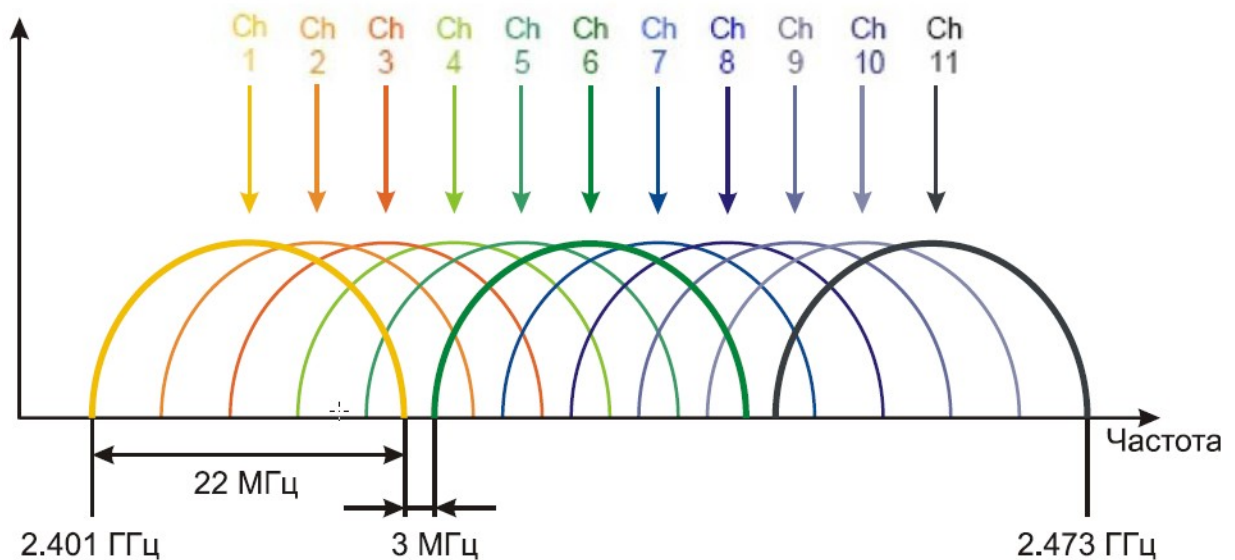


Рисунок 3.4 – Каналы, используемые в DSSS

### 3.2. Стандарт IEEE 802.11b

В сентябре 1999 г. появилось дополнение к стандарту 802.11 – спецификация 802.11b. Она рассматривала работу в диапазоне ISM (2,4...2,4835 ГГц) только методом DSSS и расширяла диапазон скоростей до 5.5 и 11 Мбит/с. Характерно, что в то же время был опубликован и стандарт 802.11a, ориентированный на работу в 5-ГГц диапазоне на скоростях до 54 Мбит/с.

По сути 802.11b – это расширение стандарта 802.11. На скоростях 1 и 2 Мбит/с – DSSS и коды Баркера, а на скоростях 5.5 и 11 Мбит/с используются так называемые **комплементарные коды** (ССК – Complementary Code Keying).

Скорость передачи также составляет 11 Мчип/с, что соответствует ширине спектра 22 МГц. Однако для кодирования информации используются не 11-чиповые коды Баркера, а 8-чиповые комплексные последовательности. Использование таких последовательностей (комплементарных кодов) позволяет в одном символе (т.е. 8-ю чипами) кодировать сразу 8 бит информации, что обеспечивает скорость 11 Мбит/с или кодировать 4 бита информации, что обеспечивает скорость 5,5 Мбит/с.

#### Комплементарные коды

Рассмотрим алгоритм формирования ССК для скорости 5,5 Мбит/с.

1) Поток битов группируется в символы по 4 бита (четные и нечетные). Биты в каждой группе обозначим  $[b_0 b_1 b_2 b_3]$  как показано на рисунке 3.5.



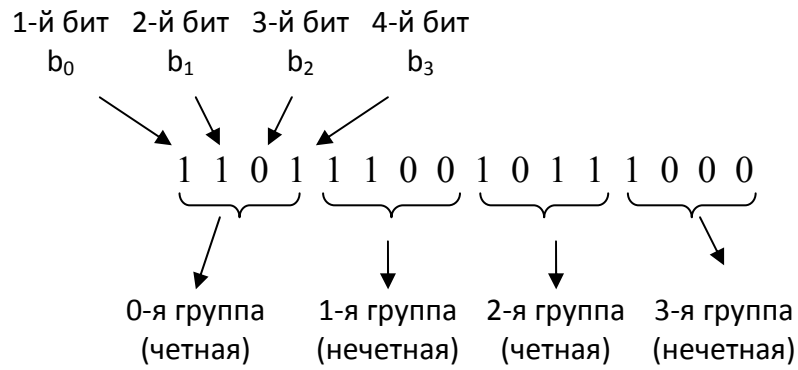


Рисунок 3.5 – Группировка исходного потока битов

2) Каждая группа (4 бита) заменяется последовательностью из 8 чипов:

$$C = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8\},$$

где каждый чип – это сигнал, фаза которого определяется на основе функций Уолша-Адамара следующим образом:

$$C_1 = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4$$

$$C_2 = \varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4$$

$$C_3 = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_4$$

$$C_4 = \varphi_1 + \varphi_4 \pm \pi$$

$$C_5 = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3$$

$$C_6 = \varphi_1 + \varphi_3$$

$$C_7 = \varphi_1 + \varphi_2 \pm \pi$$

$$C_8 = \varphi_1$$

Причем, значения фаз  $\varphi_1$  и  $\varphi_4$  определяются по 3-му и 4-му битам группы, т.е. по битам  $b_2$  и  $b_3$  следующим образом:

$$\begin{cases} \varphi_2 = b_2 \cdot \pi + \pi/2 \\ \varphi_3 = 0 \\ \varphi_4 = b_3 \cdot \pi \end{cases}$$

$\varphi_1$  определяется по первому дибиту группы (т.е. по битам  $b_0$  и  $b_1$ ) в зависимости от того, четная эта группа или нечетная (таблица 3.1):

Таблица 3.2 – Выбор фазы  $\varphi_1$

Входной дибит (биты $b_0$ и $b_1$ )	$\varphi_1$	
	<i>четная группа</i>	<i>нечетная группа</i>
00	0	$\pi$
01	$\pi/2$	$-\pi/2$
10	$-\pi/2$	$\pi/2$
11	$\pi$	0

Стандарт IEEE 802.11–2007 стр. 676

Определим значения элементов последовательности  $C$  для 0-й группы исходного потока битов (рис. 3.5). Итак, «1101» – группа четная, тогда:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \pi \text{ (поскольку группа четная)} \\ \varphi_2 = b_2 \cdot \pi + \pi/2 = 0 \cdot \pi + \pi/2 = \pi/2 \\ \varphi_3 = 0 \\ \varphi_4 = b_3 \cdot \pi = 1 \cdot \pi = \pi, \end{array} \right.$$

Используя значения фаз  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  и  $\varphi_4$ , вычислим элементы последовательности:

$$C_1 = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = \pi/2$$

$$C_2 = \varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4 = 0$$

$$C_3 = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_4 = \pi/2$$

$$C_4 = \varphi_1 + \varphi_4 \pm \pi = \pi$$

$$C_5 = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = -\pi/2$$

$$C_6 = \varphi_1 + \varphi_3 = \pi$$

$$C_7 = \varphi_1 + \varphi_2 \pm \pi = \pi/2$$

$$C_8 = \varphi_1 = \pi$$

Удобно представлять элементы последовательности в форме комплексных чисел. Поскольку используются фазы 0,  $\pi/2$ ,  $\pi$  и  $-\pi/2$ , комплексные числа, соответствующие этим фазам (рис. 3.6), имеют либо только вещественную часть (1 или  $-1$ ), либо только мнимую часть ( $i$  или  $-i$ ).

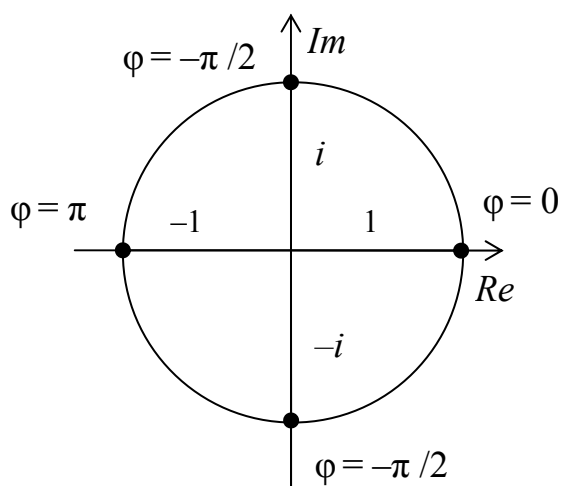


Рисунок 3.6 – Геометрическое представление комплексных чисел

Таким образом, фазе

$$\varphi = 0 \text{ соответствует «1»,}$$

$$\varphi = \pi/2 \rightarrow \langle i \rangle,$$

$$\varphi = \pi \rightarrow \langle -1 \rangle,$$

$$\varphi = -\pi/2 \rightarrow \langle -i \rangle.$$

Представим элементы полученной ранее последовательности в комплексной форме:

$$C = \{i, 1, i, -1, -i, -1, i, -1\}.$$

Следует отметить, что если бы наша группа исходных битов (1101) была нечетной, то у всех элементов последовательности просто сменился бы знак.

Рассмотрим алгоритм формирования ССК для скорости 11 Мбит/с.

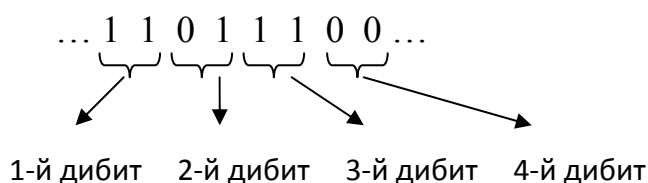
- 1) Поток битов группируется в символы по 8 бит (четные и нечетные группы).
- 2) Первый дибит (биты  $b_0$   $b_1$ ) определяет значение фазы  $\varphi_1$  так же, как и для скорости 5,5 Мбит/с (по таблице 3.2).
- 3) Фаза  $\varphi_2$  – выбирается по второму дибиту (биты  $b_2$  и  $b_3$ ), фаза  $\varphi_3$  – по третьему дибиту (биты  $b_4$  и  $b_5$ ),  $\varphi_4$  – по четвертому дибиту (биты  $b_6$  и  $b_7$ ) из таблицы 3.3.

Таблица 3.3 – Выбор фаз  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  или  $\varphi_4$

Дибиты 2, 3 или 4 (биты $b_2b_3$ , $b_4b_5$ , $b_6b_7$ )	Фазы $\varphi_2$ , $\varphi_3$ или $\varphi_4$
00	0
01	$\pi/2$
10	$\pi$
11	$-\pi/2$

Стандарт IEEE 802.11–2007 стр. 676

Предположим, на вход ССК-модулятора поступила последовательность битов:



Пусть эта группа четная, тогда:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \pi \\ \varphi_2 = \pi/2 \\ \varphi_3 = -\pi/2 \\ \varphi_4 = 0, \end{array} \right.$$

Вычислим элементы последовательности:

$$C_1 = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = \pi \rightarrow -1$$

$$C_2 = \varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4 = \pi/2 \rightarrow i$$

$$C_3 = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_4 = -\pi/2 \rightarrow -i$$

$$C_4 = \varphi_1 + \varphi_4 \pm \pi = 0 \rightarrow 1$$

$$C_5 = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = \pi \rightarrow -1$$

$$C_6 = \varphi_1 + \varphi_3 = \pi/2 \rightarrow i$$

$$C_7 = \varphi_1 + \varphi_2 \pm \pi = \pi/2 \rightarrow i$$

$$C_8 = \varphi_1 = \pi \rightarrow -1$$

Таким образом, нашей группе исходных битов соответствует последовательность:

$$C = \{-1, i, -i, 1, -1, i, i, -1\}.$$

### Двоичное пакетное сверточное кодирование

Двоичное пакетное сверточное кодирование (PBCC – Packet Binary Convolutional Coding) – еще один тип кодирования в семействе стандартов IEEE 802.11 (а именно, в стандартах «b» и «g» – опционально, для скоростей 5,5; 11; 22 и 33 Мбит/с).

Идея метода PBCC заключается в следующем. Входящая последовательность информационных битов преобразуется в сверточном кодере так, чтобы каждому входящему биту соответствовало более одного выходного, т.е. кодер добавляет избыточную информацию к исходной последовательности. Например, если каждому входящему биту соответствует 2 выходных, то говорят о сверточном кодировании со скоростью  $R = 1/2$ , если 2-м выходным битам поставить в соответствие 3 выходных, то  $R = 2/3$ .

Кроме того, сверточный кодер имеет несколько запоминающих ячеек, в которых хранится информация о нескольких предыдущих значениях входных битов.

Выходные биты, формируемые в сверточном кодере, определяются операциями XOR между значениями входного бита и битами, хранимыми в запоминающих ячейках, т.е. значение выходного бита зависит не только от входного, но и от нескольких предыдущих.

В технологии PBCC используется сверточные кодеры на семь состояний ( $K=7$ , т.е. 6 запоминающих ячеек) со скоростью  $R = 1/2$ .

Итак, каждому входному биту  $x_i$  ставится в соответствие два выходных ( $y_0$  и  $y_1$ ):

$$y_0 = x_i \oplus x_{i-1} \oplus x_{i-3} \oplus x_{i-4} \oplus x_{i-6}$$

$$y_1 = x_i \oplus x_{i-2} \oplus x_{i-3} \oplus x_{i-4} \oplus x_{i-5} \oplus x_{i-6}$$

Знак  $\oplus$  означает «сложение по модулю 2» («XOR», «исключающее или»). Это операция, результат которой равен «0», если оба операнда равны, во всех остальных случаях результат равен «1».

Рассмотрим работу схемы кодирования для информационной скорости 5,5 Мбит/с (рис. 3.7).

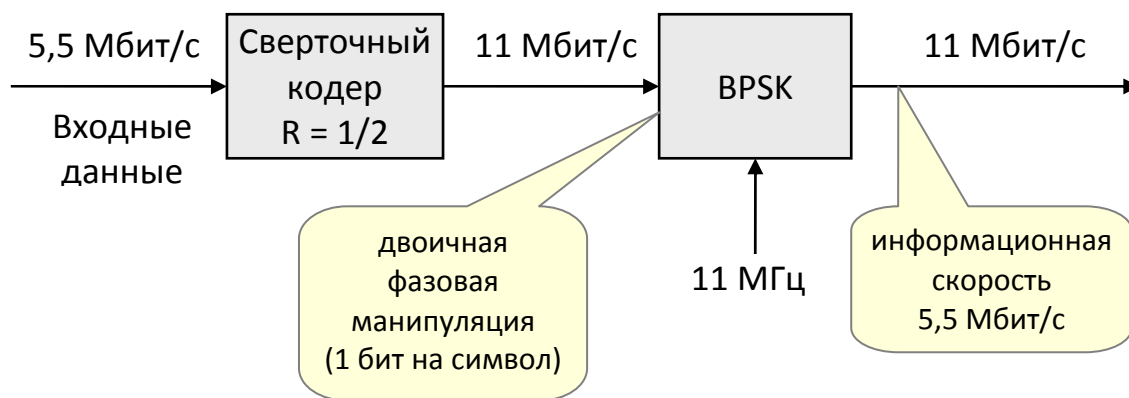


Рисунок 3.7 – Информационная скорость 5,5 Мбит/с

Использование двоичной фазовой манипуляции (один бит в одном символе), обеспечивает передачу данных со скоростью 11 Мбит/с. Однако информационная скорость соответствует скорости входного потока (5,5 Мбит/с).

Рассмотрим работу схемы кодирования для информационной скорости 11 Мбит/с (рис. 3.8).

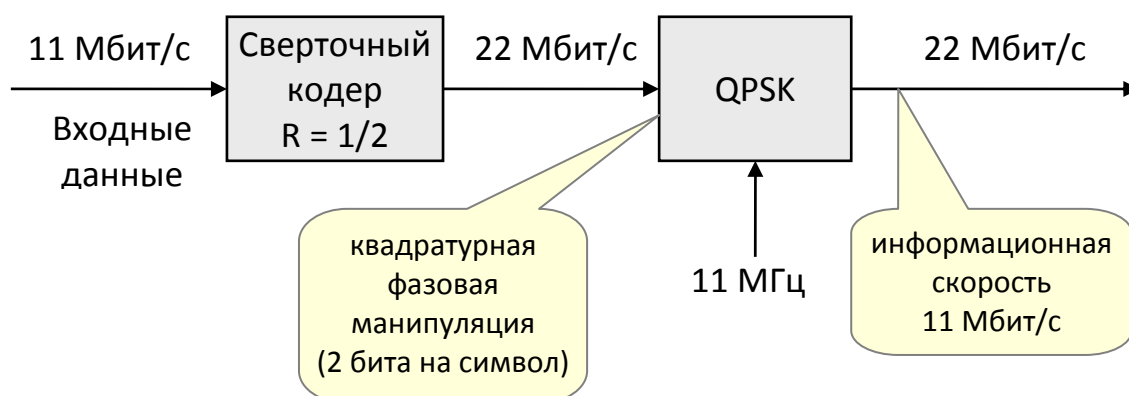


Рисунок 3.8 – Информационная скорость 11 Мбит/с

Использование квадратурной фазовой манипуляции (два бита в одном символе), обеспечивает передачу данных со скоростью 22 Мбит/с. При этом информационная скорость соответствует скорости входных данных (11 Мбит/с).

Рассмотрим работу схемы кодирования для информационной скорости 22 Мбит/с.

Для обеспечения такой скорости передачи необходимо использовать 16-позиционную модуляцию, например 16-QAM. Проверим. Входной поток 22 Мбит/с, сверточный кодер ( $R = 1/2$ ) увеличивает поток вдвое, т.е. до 44 Мбит/с. Следовательно, необходимо передавать 4 бита на символ. Однако разработчики технологии включили в схему 8-позиционный фазовый моду-

лятор (8-PSK), который позволяет кодировать только 3 бита на символ. Это означает, что для передачи на скорости 22 Мбит/с необходимо уменьшить избыточность, например, использовать сверточный кодер  $R = 2/3$  (на два входных бита – три выходных).

Чтобы не создавать соответствующий кодер, разработчики просто добавили в схему специальный блок – пунктурный кодер (Puncture), который просто уничтожает лишние биты. Каждый пунктурный кодер принято характеризовать матрицей (Perforation Matrix), выполняющей функцию шаблона для удаления лишних битов.

Если скорость пунктурного кодера «4:3», это означает, что на 4 входных бита приходится 3 выходных. Используя такой пунктурный кодер в паре со сверточным кодером  $R = 1/2$ , можно уменьшить общую скорость кодирования до  $2/3$ . Таким образом, каждым двум входным битам будет соответствовать три выходных (рис. 3.9).

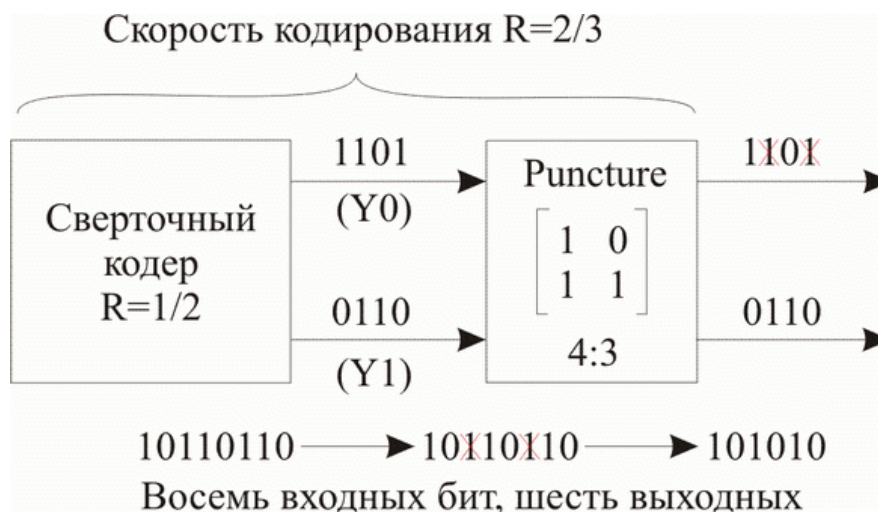


Рисунок 3.9 – Принцип работы пунктурного кодера

Рассмотрим схему кодирования для информационной скорости 22 Мбит/с.

В сверточный кодер ( $R = 1/2$ ) данные поступают со скоростью 22 Мбит/с. После добавления избыточности в сверточном кодере биты со скоростью потока 44 Мбит/с поступают в пунктурный кодер «4:3», в котором избыточность уменьшается так, чтобы на каждые четыре входных бита приходилось три выходных. Следовательно, после пунктурного кодера скорость потока составит уже 33 Мбит/с (это не информационная скорость, а общая скорость с учетом добавленных избыточных битов). Полученная в результате последовательность направляется в фазовый модулятор 8-PSK, где каждые три бита «упаковываются» в один символ. При этом скорость передачи составит 11 Мегасимволов/с, а информационная – 22 Мбит/с (рис. 3.10).

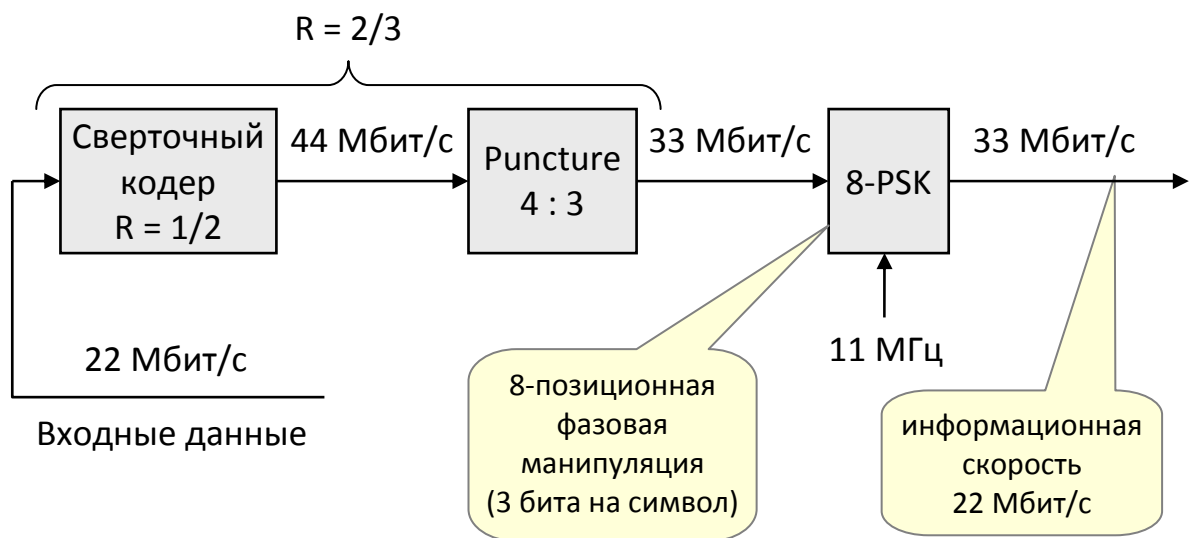


Рисунок 3.10 – Информационная скорость 22 Мбит/с

Схема кодирования для информационной скорости 33 Мбит/с аналогична представленной на рисунке 3.10, за исключением того, что на модулятор подается частота 16,5 МГц (а не 11 МГц). В результате символьная скорость передачи увеличивается до 16,5 Мегасимволов/с (рис. 3.11).

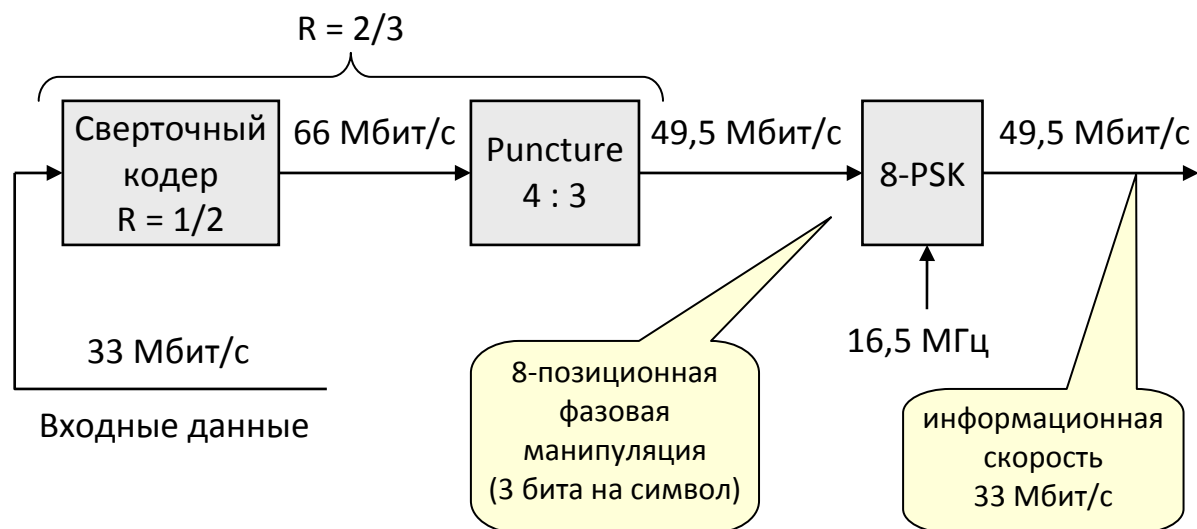


Рисунок 3.11 – Информационная скорость 33 Мбит/с

В приемнике для восстановления исходной последовательности битов применяется декодер Витерби. Метод Витерби представляет собой декодирование по максимальному правдоподобию.

Использование сверточного кодирования в сочетании с алгоритмом Витерби позволяет не только обнаруживать, но и в подавляющем большинстве случаев исправлять ошибки передачи на приемной стороне.



### 3.3. Стандарт IEEE 802.11a

В сентябре 1999 г. принят стандарт IEEE 802.11a, который предполагает использование диапазона частот от 5,150 до 5,350 ГГц и от 5,725 до 5,825 ГГц. В США этот диапазон называют диапазоном нелицензионной национальной информационной инфраструктуры (UNII – Unlicensed National Information Infrastructure).

В соответствии с правилами FCC (Federal Communications Commission – федеральная комиссия по связи США) частотный диапазон разбит на три 100-мегагерцовых поддиапазона, различающимися ограничениями по максимальной мощности излучения.

Таблица 3.4 – Поддиапазоны диапазона UNII

Поддиапазон	Допустимая мощность
5,150 – 5,250 ГГц	50 мВт
5,250 – 5,350 ГГц	250 мВт
5,725 – 5,825 ГГц	1 Вт

Весь частотный диапазон шириной 300 МГц (200 + 100) разделен на 12 каналов шириной 20 МГц каждый (рис. 3.12).

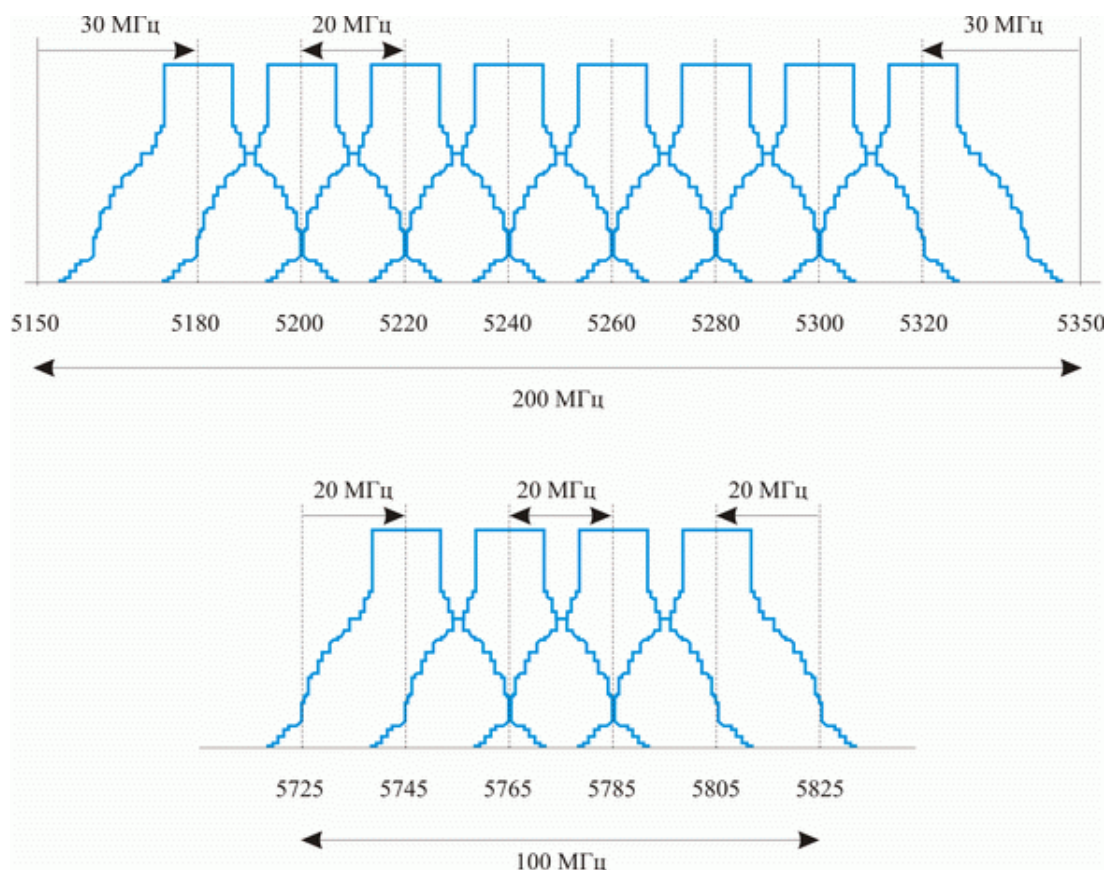


Рисунок 3.12 – Разделение диапазона UNII на 12 частотных каналов

Рисунок 3.12 показывает, что 8 каналов из 12 лежат в нижнем 200-мегагерцовом диапазоне, а 4 – в верхнем 100-мегагерцовом диапазоне (рис. 3.12). Верхний диапазон, предусматривающий наибольшую мощность, обычно используется для передачи сигналов вне помещений.

В нашей стране для беспроводных сетей также выделен диапазон частот 5 ГГц. Приказом Министерства связи и массовых коммуникаций РФ от 14.09.2010 г. № 124 «Об утверждении правил применения оборудования радиодоступа. Часть I. Правила применения оборудования радиодоступа для беспроводной передачи данных в диапазоне от 30 МГц до 66 ГГц» с изменениями на 06.07.2020 г. (зарегистрировано в Минюсте РФ 12.10.2010 г. № 18695) для стандарта 802.11a выделены 2 частотные полосы (5 рабочих поддиапазонов) как указано в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Поддиапазоны диапазона 5 ГГц в РФ

Полоса частот	Рабочие поддиапазоны	Допустимая мощность
5,150 – 5,350 ГГц	5,150 – 5,250 ГГц 5,250 – 5,350 ГГц	100 мВт
5,650 – 6,425 ГГц	5,650 – 5,725 ГГц 5,725 – 5,825 ГГц 5,825 – 6,425 ГГц	1 Вт

В качестве основного метода расширения спектра в стандарте 802.11a принят OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов.

Максимальная скорость передачи данных – 54 Мбит/с.

### Суть метода OFDM

Поток передаваемых данных распределяется по множеству частотных подканалов, и передача ведется параллельно на всех этих подканалах. Высокая скорость передачи достигается именно за счет одновременной передачи данных по всем подканалам, тогда как в отдельном подканале данные передаются с невысокой скоростью.

При частотном разделении каналов необходимо, чтобы ширина отдельного канала была, с одной стороны, достаточно узкой для минимизации искажений сигнала в пределах отдельного канала, а с другой – достаточно широкой для обеспечения требуемой скорости передачи. Кроме того, для экономичного использования всей полосы канала, разделяемого на подканалы, надо как можно более плотно расположить подканалы, но при этом избежать межканальной интерференции, чтобы обеспечить полную независи-

мость каналов друг от друга. Частотные каналы (подканалы), удовлетворяющие перечисленным требованиям, называются **ортогональными** (т.е. несущие сигналы всех частотных подканалов ортогональны друг другу).

С точки зрения математики ортогональность функции означает, что их произведение, усредненное на некотором интервале, должно быть равно нулю:

$$\int_0^{t_u} \sin 2\pi f_l t \sin 2\pi f_k t dt = 0, k \neq l$$

где  $t_u$  – время передачи одного символа,  
 $f_l$  и  $f_k$  – несущие частоты подканалов  $l$  и  $k$ .

Ортогональность несущих можно обеспечить в том случае, если за время передачи одного символа несущий сигнал будет совершать целое число колебаний (рис. 3.13).

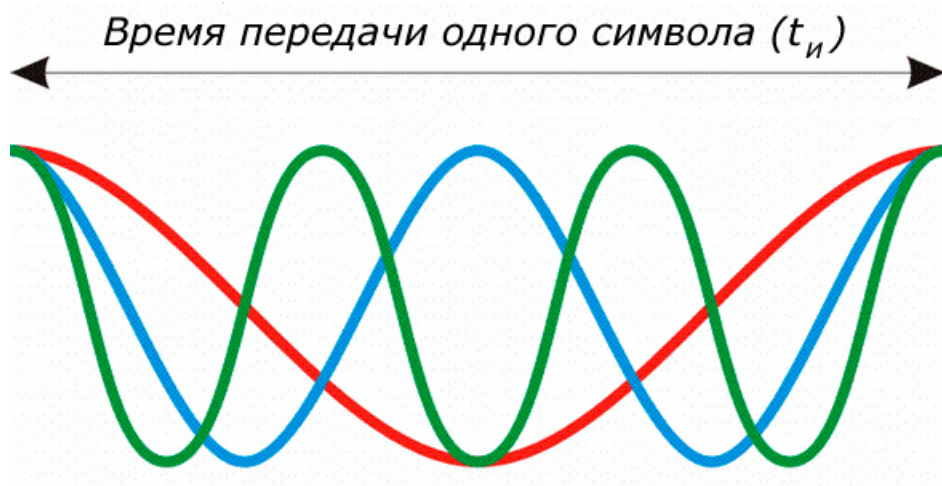


Рисунок 3.13 – Ортогональные частоты

Итак, каждый из 12 каналов диапазона UNII имеет ширину 20 МГц. Для разделения канала на подканалы используется обратное преобразование Фурье с окном в 64 частотных подканала. Разнос несущих частот имеет шаг:

$$20 \text{ МГц} / 64 = 312,5 \text{ кГц.}$$

Однако из 64 ортогональных подканалов задействуется только 52, причем только 48 из них применяются для передачи данных (Data Tones), а остальные для передачи служебной информации (Pilot Tones) (рис. 3.14).

Рисунок показывает, что подканалы частично перекрывают друг друга, но их ортогональность гарантирует частотную независимость, а значит и отсутствие межканальной интерференции.

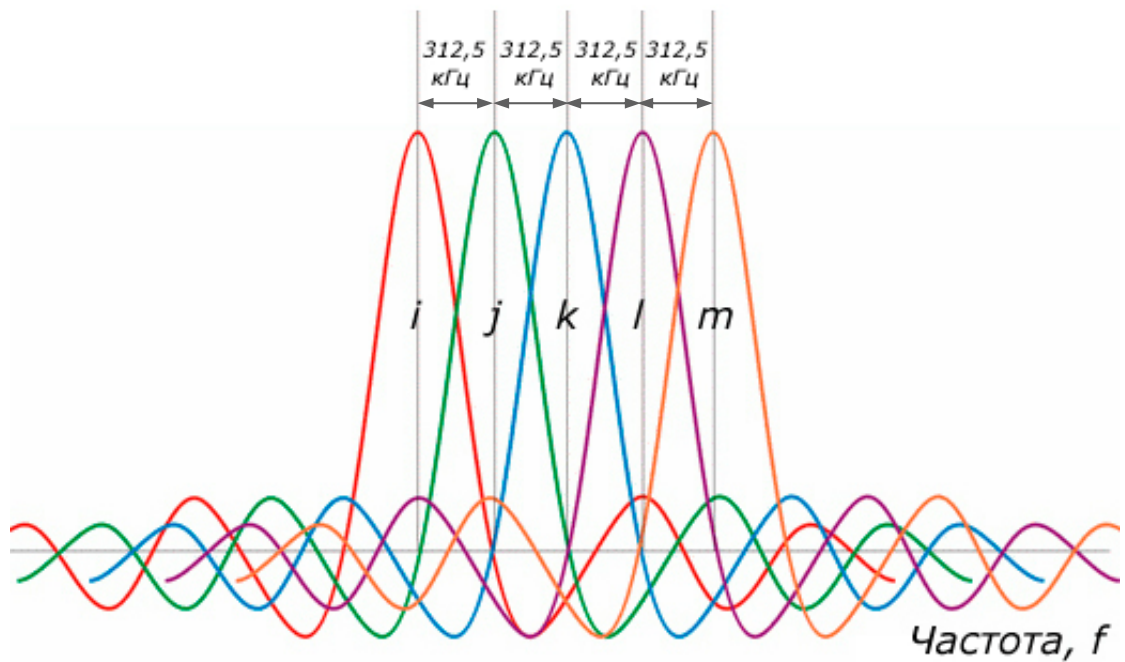


Рисунок 3.14 – Спектры частот ортогональных подканалов

Рисунок показывает, что подканалы частично перекрывают друг друга, но их ортогональность гарантирует частотную независимость, а значит и отсутствие межканальной интерференции.

Значения ортогональных частот вычисляются следующим образом:

1) Вычисляется интервал  $\Delta f$  (шаг частот):

$$\Delta f = \Delta F / 2^N,$$

где  $\Delta F$  – доступная полоса частот (ширина канала), а  $2^N$  – любое число, являющееся степенью двойки.

2) Вычисляются значения несущих частот в ортогональных подканалах:

$$f_n = f_0 + \Delta f \cdot k,$$

где  $k$  – принимает значения от  $-32$  до  $+32$  (вернее, от  $-26$  до  $+26$ , поскольку используется только 52 подканала), причем центральная частота  $f_0$  ( $k = 0$ ) не задействуется.

Рассмотрим пример.

Дано:

Центральная частота канала  $f_0 = 100$  Гц,

Ширина канала  $\Delta F = 16$  Гц.

Разделим доступный канал на ортогональные подканалы. Будем использовать, например, 8 ( $2^3$ ) поднесущих:

$$\Delta f = \Delta F / 8 = 16 \text{ Гц} / 8 = 2 \text{ Гц}.$$

Вычислим значения ортогональных частот:

$$f_{-4} = 92 \text{ Гц}, f_{-3} = 94 \text{ Гц}, f_{-2} = 96 \text{ Гц}, f_{-1} = 98 \text{ Гц},$$

$$f_0 = 100 \text{ Гц} - \text{использовать нельзя},$$

$$f_1 = 102 \text{ Гц}, f_2 = 104 \text{ Гц}, f_3 = 106 \text{ Гц}, f_4 = 108 \text{ Гц}.$$

Определим время передачи одного символа.

Рисунок 3.14 показывает, что ширина каждого подканала равна удвоенному шагу частот ( $2\Delta f$ ). Известно также, что ширина спектра обратно пропорциональна времени передачи символа (и равна  $2/t_{\text{и}}$ ). Следовательно:

$$2\Delta f = 2/t_{\text{и}}.$$

Таким образом,

$$t_{\text{и}} = 1/\Delta f.$$

Поскольку  $\Delta f = 2 \text{ Гц}$ , то время передачи символа составляет  $0,5 \text{ с}$  ( $t_{\text{и}} = 0,5 \text{ с}$ ).

Если вычисленные ранее частоты являются ортогональными, то за время передачи одного символа ( $t_{\text{и}} = 0,5 \text{ с}$ ) каждая из них сделает целое количество полных периодов.

Проверим это:

$$92 \text{ Гц} \cdot 0,5 \text{ с} = 46 \text{ периодов},$$

$$94 \text{ Гц} \cdot 0,5 \text{ с} = 47,$$

$$96 \text{ Гц} \cdot 0,5 \text{ с} = 48 \text{ и т.д.}$$

Таким образом, выбранные поднесущие являются ортогональными.

Рассмотренный способ деления широкополосного канала на ортогональные частотные подканалы называется ортогональным частотным разделением с мультиплексированием (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Для его реализации в передающих устройствах используется обратное быстрое преобразование Фурье (IFFT), переводящее предварительно мультиплексированный на  $N$  каналов сигнал из временного представления в частотное (рис. 3.15).

Итак, канал стандарта 802.11a разделен на подканалы с частотным интервалом  $\Delta f = 312,5 \text{ КГц}$ . Следовательно, время передачи одного символа в подканале:

$$t_{\text{и}} = 1/312,5 \text{ кГц} = 3,2 \text{ мкс}.$$

За это время, передавая информацию по 48 подканалам одновременно, можно передать 48 символов.

Если использовать бинарную модуляцию (1 бит на символ), то можно передавать данные со скоростью:

$$48 \text{ бит} / 3,2 \text{ мкс} = 15 \text{ Мбит/с}.$$

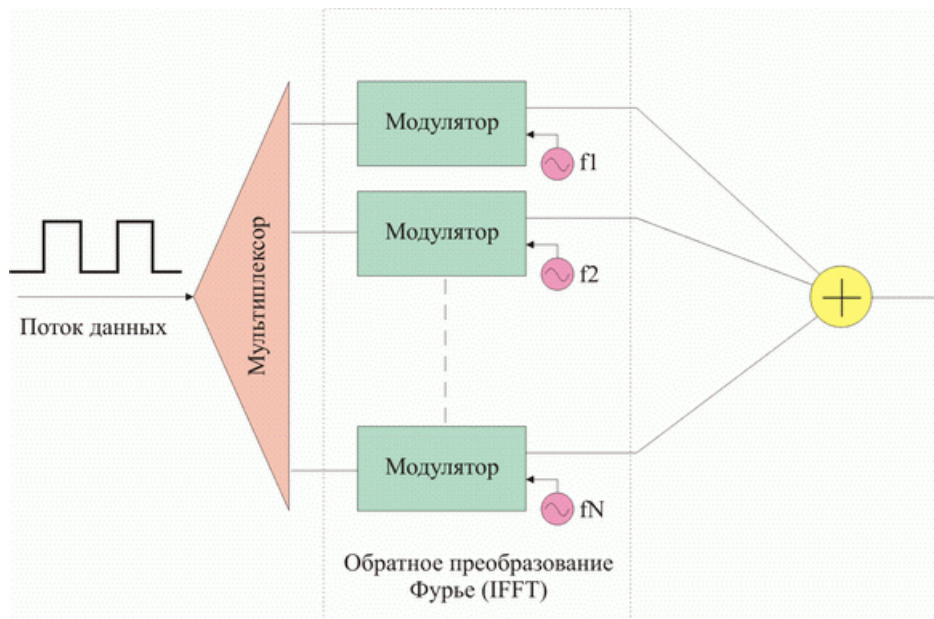


Рисунок 3.15 – Осуществление обратного быстрого преобразования Фурье для получения  $N$  ортогональных частотных подканалов

Однако в стандарте 802.11a (и «g») время передачи символа увеличено на 0,8 мкс (на 1/4 длительности символа) до 4 мкс за счет добавления к началу OFDM-символа так называемого защитного (охранного) интервала (GI – Guard Interval) (рис. 3.16). Это делается для защиты сигналов от межсимвольной интерференции, которая возникает в результате многолучевого распространения.

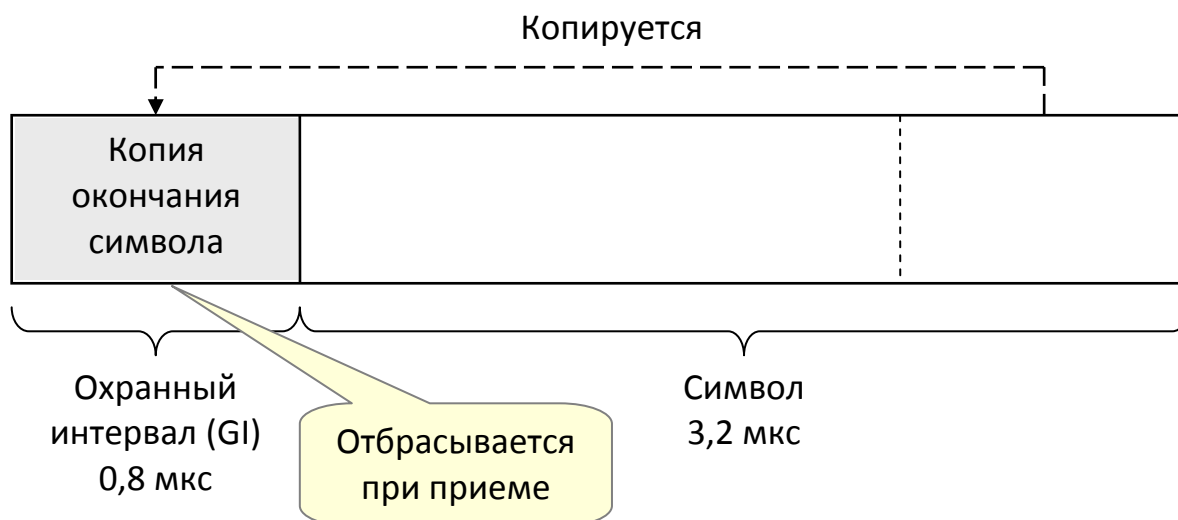


Рисунок 3.16 – Добавление к символу охранного интервала

На рисунке 3.17 показано как поступают в приемник прямой и отраженный сигналы.

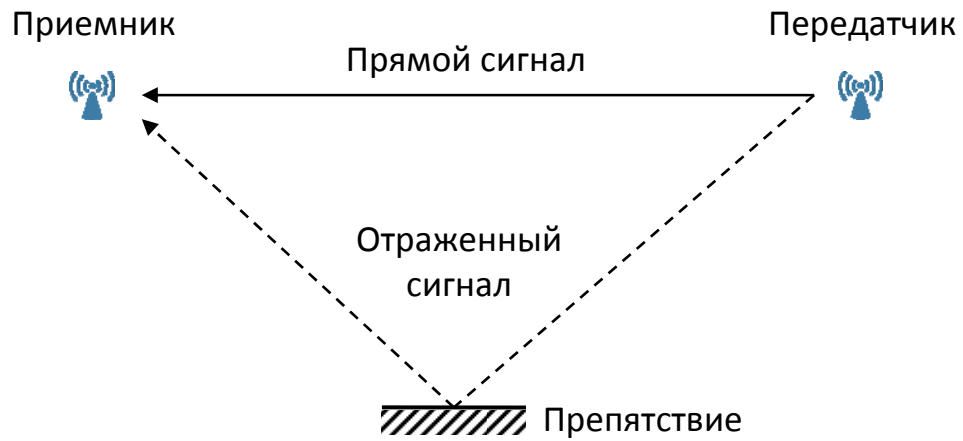


Рисунок 3.17 – Многолучевое распространение сигнала

Очевидно, что отраженный сигнал прошел больший путь, нежели прямой. Из-за этого и возникают задержки, которые приводят к внутрисимвольной и межсимвольной интерференции. Следствием многолучевой интерференции является искажение принимаемого сигнала. Наиболее отрицательно на искажении сигнала сказывается межсимвольная интерференция.

Предположим, в приемник поступают две последовательности одних и тех же сигналов (прямая и задержанная). Если бы между символами не было охранного интервала (GI), то *начало* 2-го символа в прямой последовательности исказилась бы *окончанием* 1-го символа задержанной последовательности (рис. 3.18).

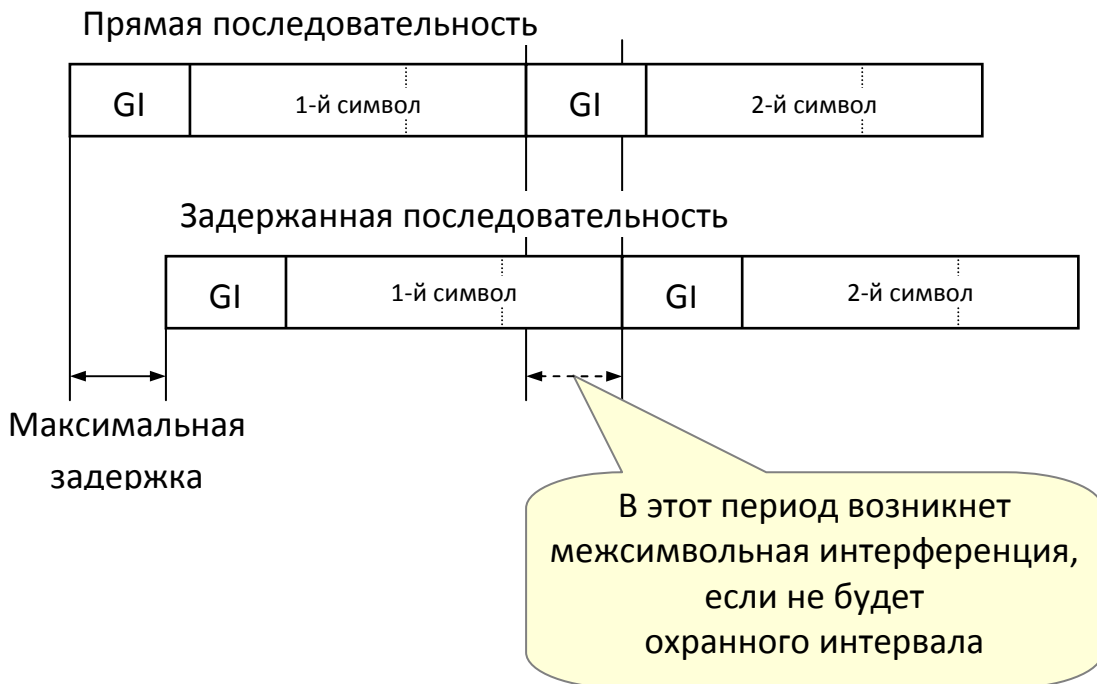


Рисунок 3.18 – Возникновение межсимвольной интерференции

Величина GI должна быть больше, чем максимальное время задержки сигнала. Это позволит исключить влияние межсимвольной интерференции, ведь искажениям подвергнется только сам охранный интервал, а он приемником отбрасывается. Максимальная задержка превысит 0,8 мкс в том случае, если путь, который прошел отраженный сигнал (со скоростью света), превысит величину:

$$0,8 \text{ мкс} \cdot 300\,000\,000 \text{ м/с} = 240 \text{ м.}$$

Это большой запас с учетом радиуса действия сети 50 – 100 м.

Итак, емкость одного OFDM-символа составляет

$$48 \cdot \log_2 M,$$

где M – число позиций модуляции.

Например, при использовании двоичной фазовой манипуляции (BPSK)  $M = 2$ , следовательно, емкость одного OFDM-символа равна 48 бит, а при использовании квадратурной фазовой манипуляции (QPSK)  $M = 4$ , следовательно, емкость OFDM-символа составит 96 бит.

В технологии IEEE 802.11a используется не только фазовая манипуляция BPSK и QPSK, но и квадратурно-амплитудная модуляция 16-QAM и даже 64-QAM:

$$M = 16 \rightarrow \log_2 16 = 4 \text{ (4 бита на символ),}$$

$$M = 64 \rightarrow \log_2 64 = 6 \text{ (6 бит на символ).}$$

Поскольку каждый OFDM-символ (вместе с охранным интервалом) имеет длительность

$$3,2 \text{ мкс} + 0,8 \text{ мкс} = 4 \text{ мкс},$$

частота следования символов составляет всего

$$1/4 \text{ мкс} = 0,25 \cdot 10^{-6} = 250 \text{ кГц.}$$

Учитывая, что используется 48 подканалов, получим

$$48 \cdot 250 \text{ кГц} = 12 \text{ МГц.}$$

Если используется BPSK, то скорость передачи данных составит 12 Мбит/с, если QPSK, то 24 Мбит/с, а при использовании 64-QAM – 72 Мбит/с.

Однако не все передаваемые биты являются информационными. Чтобы обеспечить достоверность принимаемых данных, используют избыточную информацию, добавляемую сверточным кодером к информационным битам.

Если скорость сверточного кодирования составляет 1/2 ( $R = 1/2$ ), это означает, что только половина переданных битов являются информационными (а другая половина используется для обнаружения и исправления ошибок алгоритмом Витерби в приемнике).



Если скорость сверточного кодирования, например,  $3/4$  ( $R = 3/4$ ), это значит, что  $3/4$  переданных битов содержат полезную информацию.

Различные комбинации используемых методов модуляции и скоростей сверточного кодирования дают следующие скорости передачи в стандарте 802.11a (таблица 3.2).

Таблица 3.6 – Скоростные характеристики стандарта IEEE 802.11a

Общая скорость передачи	48 · 250 кГц = 12 МГц							
Тип модуляции	BPSK		QPSK		16-QAM		64-QAM	
Количество бит на символ в каждом подканале	1		2		4		6	
Скорость сверточного кодирования	1/2	3/4	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
Информационная скорость, Мбит/с	6	9	12	18	24	36	48	54

Информационные скорости 6, 12 и 24 Мбит/с являются обязательными, остальные – опциональными.

### 3.4. Стандарт IEEE 802.11g

Стандарт 802.11g утвержден в июне 2003 г.

Используемый диапазон – ISM.

Максимальная скорость передачи данных – 54 Мбит/с.

Стандарт является логическим развитием стандарта 802.11b и обратно с ним совместим (т.е. любое оборудование 802.11g должно взаимодействовать с устройствами 802.11b).

Спецификация 802.11g использует схему модуляции OFDM (как в 802.11a), перенесенную из диапазона UNII (~5 ГГц) в область 2,4 ГГц. Это возможно, поскольку в стандартах 802.11 (во всех диапазонах) ширина одного канала схожа ( $\approx 20$  МГц).

Технология OFDM является обязательной при скоростях передачи 6, 12 и 24 Мбит/с и опциональной при скоростях 9, 18, 36, 48 и 54 Мбит/с (как и в 802.11a).

Скорости передачи информации, а также технологии, используемые в стандарте 802.11g, представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Скорости передачи в стандарте IEEE 802.11g

Скорость, Мбит/с	Метод кодирования	
	обязательно	опционально
1	последовательность Баркера	
2		
5,5	ССК	PBCC
6	OFDM	
9		OFDM
11	ССК	PBCC
12	OFDM	
18		OFDM
22		PBCC
24	OFDM	
33		PBCC
36		OFDM
48		OFDM
54		OFDM

Скорости передачи, выделенные в таблице серым фоном, являются обязательными, остальные – опциональными.

### 3.5. Стандарт IEEE 802.11n

Стандарт официально принят 11 сентября 2009 г. Он предполагает использование двух частотных диапазонов:

- ISM (2,4 – 2,4835 ГГц, ширина диапазона 83,5 МГц);
- UNII (5,150 – 5,350 ГГц, 5,725 – 5,825 ГГц, ширина диапазона 300 МГц).

Теоретически 802.11n способен обеспечить скорость передачи данных до 600 Мбит/с (применяя передачу данных сразу по четырем антеннам).

Устройства 802.11n могут работать в трех режимах:

- наследуемом (Legacy), в котором обеспечивается поддержка устройств 802.11b/g и 802.11a;
- смешанном (Mixed), в котором поддерживаются устройства 802.11b/g, 802.11a и 802.11n;
- «чистом» режиме – 802.11n (именно в этом режиме обеспечивается повышенная скорость и увеличенная дальность передачи данных).

802.11n основывается на стандарте IEEE 802.11a, поскольку именно в нем описана технология OFDM. Увеличение скорости передачи данных основано на двух физических принципах:

- удвоение полосы пропускания канала (с 20 до 40 МГц);
- введение дополнительных антенных каналов приема-передачи (технология многоканальных антенных систем MIMO – Multiple Input, Multiple Output).

Рассмотрим особенности физического уровня стандарта IEEE 802.11n.

Стандарт допускает как стандартные каналы с шириной полосы 20 МГц, так и расширенные до 40 МГц. Поскольку 40-МГц каналы противостоят национальной политике распределения частотных ресурсов ряда стран, то их применение – это опциональная (необязательная) возможность.

Стандарт предусматривает поддержку традиционных режимов передачи (как в 802.11a) и режимов с высокой пропускной способностью (HT – High Throughput). В традиционных (L) режимах число поднесущих не изменено. В HT-режимах оно увеличено. В 20-МГц канале их 56, из них 52 – информационные и 4 пилотные. Это позволяет увеличить скорость на 8%.

Емкость OFDM-символа составляет

$$52 \cdot \log_2 M, \text{ где } M \text{ – число позиций модуляции.}$$

При использовании QAM-64,  $M = 64$  (т.к.  $64 = 2^6$ ). Следовательно, каждый OFDM-символ содержит

$$52 \cdot 6 = 312 \text{ бит.}$$

Длительность OFDM-символа составляет 4 мкс, что соответствует символьной скорости 250 000 символов/с.

Вычислим битовую скорость:

$$N = 312 \cdot 250\,000 = 78 \text{ Мбит/с.}$$

Не все биты являются информационными, поскольку используется сверточный кодер со скоростью  $R = 3/4$  (на 3 бита исходной информации приходится 4 бита кодированной).

Таким образом, информационная скорость составит

$$N_{\text{инф}} = 78 \cdot 3 / 4 = 58,5 \text{ Мбит/с.}$$

Еще один путь увеличения скорости – повышение скорости сверточного кодирования до  $5/6$  (на 5 бит исходной информации приходится 6 бит кодированной). В результате информационная скорость составит

$$N_{\text{инф}} = 78 \cdot 5 / 6 = 65 \text{ Мбит/с.}$$

Опционально предусмотрена возможность двукратного сокращения длительности защитных интервалов GI в OFDM-символах – с 0,8 до 0,4 мкс.

В результате длительность OFDM-символа уменьшится до 3,6 мкс, что приведет к увеличению символьной скорости ~ до 278 000 символов/с. При скорости сверточного кодирования  $R = 5/6$  информационная скорость достигнет

$$N_{\text{инф}} \approx 72,2 \text{ Мбит/с (опционально).}$$

Режим 20 МГц – обязательный, для него установлен базовый набор скоростей (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Базовый набор скоростей стандарта 802.11n

Модуляция	Скорость сверточного кодирования	Количество бит на символ в каждом подканале	Емкость OFDM-символа	Информационная скорость	
				GI=0,8 мкс	GI=0,4 мкс
BPSK	1/2	1	52	6,5	7,2
QPSK	1/2	2	104	13,0	14,4
QPSK	3/4	2	104	19,5	21,7
16-QAM	1/2	4	208	26,0	28,9
16-QAM	3/4	4	208	39,0	43,3
64-QAM	1/2	6	312	52,0	57,8
64-QAM	3/4	6	312	58,5	65,0
64-QAM	5/6	6	312	65,0	72,2

В 40-МГц каналах используется 114 поднесущих, из них 108 информационных и 6 пилотных. Благодаря этому пропускная способность канала увеличивается на 125%. В результате информационная скорость составит:

- 135 Мбит/с (если GI = 0,8 мкс);
- 150 Мбит/с (если GI = 0,4 мкс).

Традиционный режим также позволяет удваивать скорость передачи данных, используя 40-МГц каналы. Фактически передача ведется на двух смежных каналах стандарта 802.11a, используются  $52 \cdot 2 = 104$  поднесущие. Таким образом, скорость передачи увеличивается на 100%.

Ключевое отличие стандарта IEEE 802.11n от его предшественников – использование технологии MIMO.

Технология MIMO (Multiple Input Multiple Output – много входов, много выходов) предполагает применение нескольких передающих и прини-

мающих антенн. По аналогии традиционные системы, то есть системы с одной передающей и одной принимающей антенной, называются SISO (Single Input Single Output). Теоретически MIMO-система с  $n$  передающими и  $n$  принимающими антеннами способна обеспечить пиковую пропускную способность в  $n$  раз большую, чем системы SISO. Это достигается за счет того, что передатчик разбивает поток данных на независимые последовательности бит и пересылает их одновременно, используя массив антенн. Такая техника передачи называется пространственным мультиплексированием. Отметим, что все антенны передают данные независимо друг от друга в одном и том же частотном диапазоне. Технология MIMO никак не затрагивает метод кодирования данных и в принципе может использоваться в сочетании с любыми методами физического и логического кодирования.

В стандарте IEEE 802.11n допускается использование до четырех антенн у точки доступа и беспроводного адаптера. Обязательный режим подразумевает поддержку двух антенн у точки доступа и одной антенны и беспроводного адаптера.

Таким образом, при использовании 4-х передающих и 4-х принимающих антенн, в 40-МГц НТ-каналах (114 поднесущих) с коротким охранном интервалом ( $GI = 0,4$  мкс) можно достичь информационной скорости

$$N_{\text{инф}} = 4 \cdot 150 = 600 \text{ Мбит/с.}$$

### **3.6. Стандарт IEEE 802.11ac**

Окончательные спецификации стандарта 802.11ac для локальных беспроводных сетей были приняты IEEE в начале 2014 г. Разработки велись почти 5 лет и были направлены на дальнейшее увеличение скорости, снижение энергопотребления и повышение стабильности сигнала.

Рассмотрим усовершенствования, внесенные разработчиками.

Было решено отказаться от использования диапазона ISM (2,4 – 2,4835 ГГц), поскольку он слишком активно эксплуатируется большим количеством устройств Wi-Fi, Bluetooth, СВЧ-печками и другими бытовыми приборами. Кроме того, диапазон ISM не позволяет использовать каналы шириной 80 и 160 МГц.

Значительное повышение скорости обеспечивается за счет сразу нескольких изменений:

- Увеличение ширины канала в два и даже в четыре раза. Если 802.11n предусматривал увеличение ширины канала с 20 до 40 МГц, то в 802.11ac Wave 1 ширина канала может составлять 80 МГц, а в 802.11ac

Wave 2 целых 160 МГц, что позволяет повысить скорость на 117% и 333% соответственно.

- Использование более плотной 256-позиционной квадратурно-амплитудной модуляции (256-QAM), которая позволяет передавать 8 бит в одном символе. В сравнении с 64-QAM в стандартах 802.11a/g/n (6 бит на символ) это дает увеличение скорости на 33% при той же ширине канала.

Известно, что максимальная скорость, на которую способны устройства 802.11n (модуляция 64-QAM, скорость сверточного кодирования  $R = 5/6$  и длительности охранного интервала  $GI = 0,4$  мкс) в режиме SISO, составляет 150 Мбит/с. Использование канала шириной 80 МГц и модуляции 256-QAM при прочих равных условиях позволяет увеличить скорость до 433 Мбит/с:

$$N_{\text{инф}} = 150 \text{ Мбит/с} \cdot 2,17 \cdot 1,33 = 433 \text{ Мбит/с}.$$

Если используется канал 160 МГц, скорость увеличивается вдвое, до 866 Мбит/с:

$$N_{\text{инф}} = 150 \text{ Мбит/с} \cdot 4,33 \cdot 1,33 = 866 \text{ Мбит/с}.$$

- Увеличено число приемников и передатчиков до 8, т.е. реализована схема MIMO 8x8. В сравнении со стандартом 802.11n, который допускал использование до четырех пространственных каналов, использование восьми каналов дает повышение скорости на 100%.

Таким образом, при использовании восьми пространственных каналов стандарт 802.11ac теоретически способен обеспечить передачу информации со скоростью почти 7 Гбит/с:

$$N_{\text{инф}} = 866 \text{ Мбит/с} \cdot 8 = 6\,928 \text{ Мбит/с}.$$

Совокупность перечисленных улучшений, реализованных в стандарте 802.11ac, представлена на рисунке 3.19.

Помимо изменений, обеспечивших значительное повышение скорости передачи данных, разработчики стандарта внесли еще целый ряд усовершенствований. Наиболее интересными являются технологии «beamforming» и «MU-MIMO». Рассмотрим их более подробно.

Формирование луча (beamforming) – это функция, которая позволяет точкам доступа или беспроводным маршрутизаторам 802.11ac фокусировать энергию беспроводного сигнала в точке, где находится приемное устройство, а не рассеивать его во все окружающее пространство. Это достигается с помощью нескольких антенн.

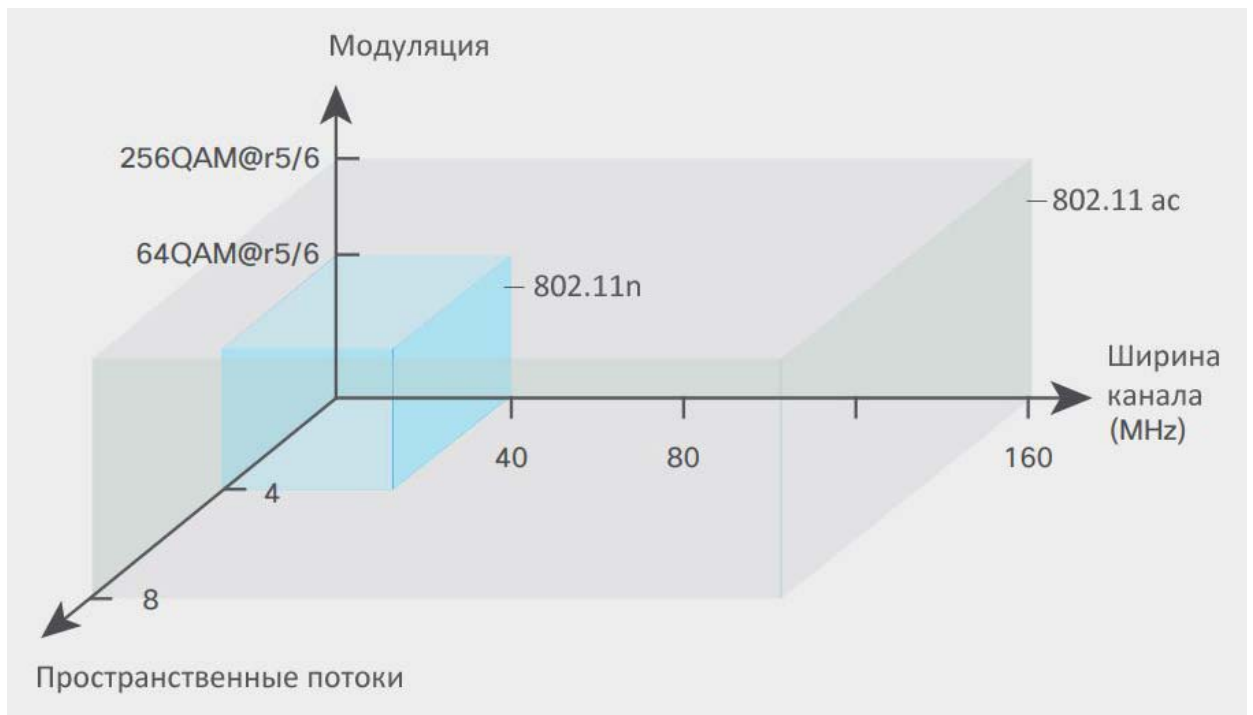


Рисунок 3.19 – Сравнение характеристик стандартов 802.11n и 802.11ac

Хотя функция формирования луча могла применяться еще в стандарте 802.11n, однако она не была стандартизирована, поэтому при использовании оборудования от разных производителей она могла работать неправильно. В стандарте 802.11ac все аспекты работы бимформинга унифицированы. Компании, производящие оборудование с поддержкой 802.11ac, не обязаны реализовывать функцию формирование луча, но если они это делают, то только согласно установленной спецификации. Это гарантирует, что оборудование каждой компании будет совместимо. Формирование луча способствует более эффективному использованию полосы пропускания беспроводной сети и увеличивает радиус ее действия (рис. 3.20).

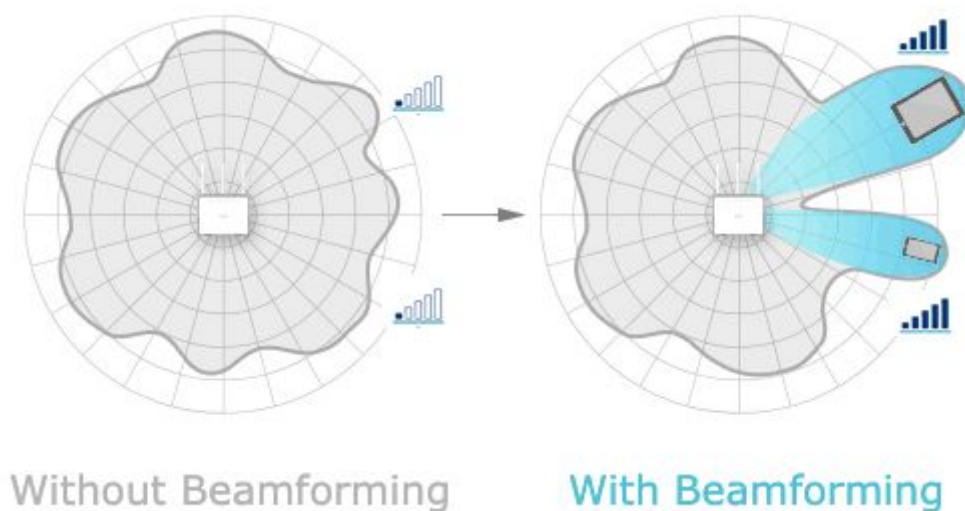


Рисунок 3.20 – Преимущества технологии формирования луча

MU-MIMO означает многопользовательский (Multi User), множественный вход, множественный выход. Технология позволяет точкам доступа или беспроводным маршрутизаторам взаимодействовать с несколькими пользователями одновременно. MU-MIMO – это следующая ступень эволюции однопользовательского (Single User) MIMO (SU-MIMO), который обычно называют просто MIMO. Технология SU-MIMO была реализована в стандарте 802.11n. В этом режиме данные для каждого беспроводного клиента передавались по очереди. Метод MU-MIMO, реализованный в стандарте 802.11ac, поддерживает одновременную передачу данных нескольким клиентам.

MU-MIMO использует технологию Beamforming, благодаря которой сигналы распространяются не хаотично, а в направлении беспроводного устройства. Эта направленность позволяет увеличить дальность сигнала и повысить скорость передачи данных.

Вместе с тем невозможно обслуживать бесконечное количество клиентов и потоков данных. Например, точка доступа с поддержкой трех потоков может одновременно работать только с тремя Wi-Fi-устройствами без задержек.

### 3.7. Стандарт IEEE 802.11ax

Новая версия стандарта 802.11 впервые была представлена осенью 2018 г. Wi-Fi Alliance предложил для неё новое название – «Wi-Fi 6». Две последние версии также были переименованы: 802.11n в «Wi-Fi 4», а 802.11ac в «Wi-Fi 5» (рис. 3.21). Объяснялось это стремлением избавиться от путаницы на рынке Wi-Fi-устройств и упростить пользователям переход на новые версии.

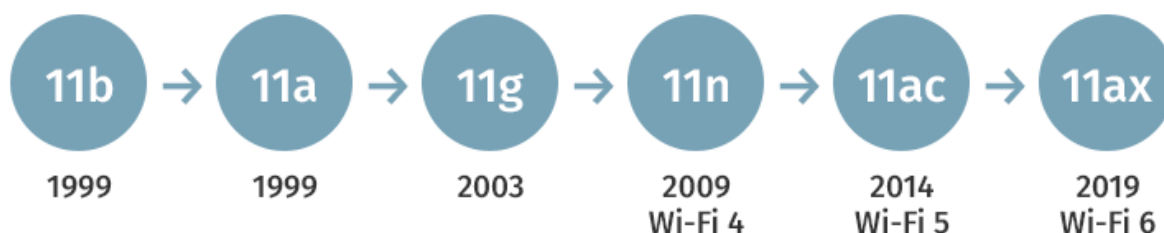


Рисунок 3.21 – Результат «ребрендинга» стандартов 802.11

В сентябре 2019 г. стандарт 802.11ax был принят. Он представляет собой улучшенную и доработанную версию стандарта 802.11ac.

Характерной особенностью стандарта является возвращение поддержки диапазона ISM, который не использовался в стандарте 802.11ac (Wi-Fi 5). Это решение позволило задействовать в популярном беспроводном стандарте все доступные частоты.



В Wi-Fi 6 была усовершенствована технология MU-MIMO. Теперь обеспечивается поддержка восходящего направления (UL MU-MIMO), тогда как в стандарте Wi-Fi 5 технология MU-MIMO работала только в нисходящем направлении – от точки доступа к клиентам (DL MIMO). Wi-Fi 6 может поддерживать одновременную передачу до 8 пространственных потоков в обоих направлениях (8x8), с возможностью доставки четырех одновременных потоков одному клиенту.

Существенным отличием нового стандарта от всех беспроводных сетей предыдущих поколений является использование технологии множественного доступа с ортогональным частотным разделением каналов (OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access).

OFDMA представляет собой «многопользовательскую» вариацию давно используемой технологии параллельной передачи данных с частотным разделением OFDM. OFDMA также делит канал связи на подканалы с помощью быстрого преобразования Фурье, однако в Wi-Fi 6 на канале 20 МГц может быть до 256 поднесущих, тогда как в Wi-Fi 5 – только до 64 (рис. 3.22).

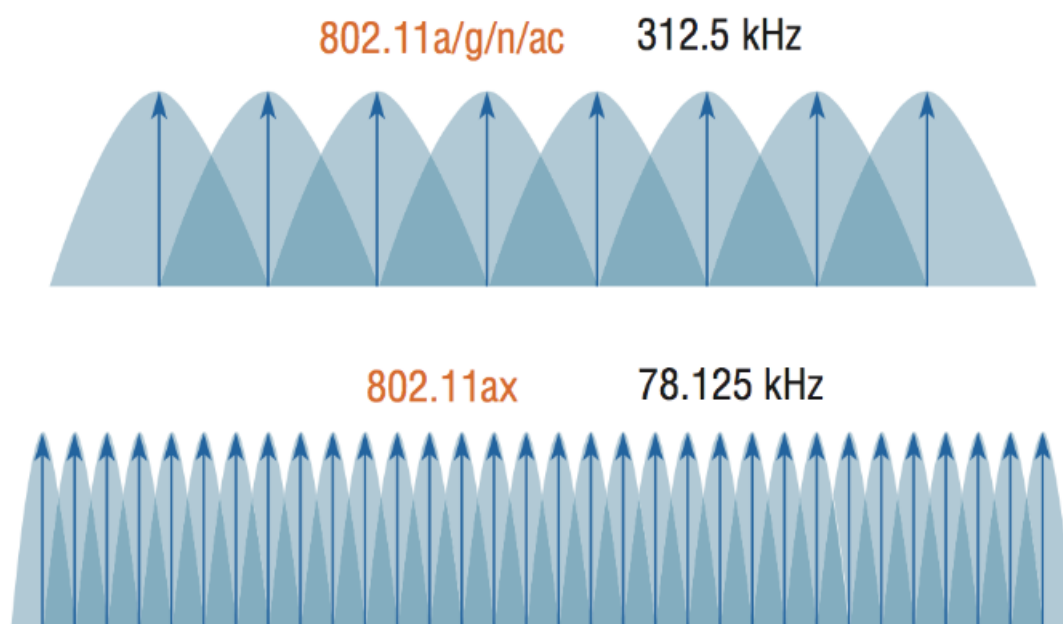


Рисунок 3.22 – Разделение канала на подканалы в разных стандартах

OFDMA дает возможность установления исходящих и входящих соединений между точкой доступа и несколькими клиентами одновременно за счет выделения для отдельных клиентов подмножеств поднесущих, называемых «ресурсными единицами» (Resource Units).

При использовании канала 20 МГц, точка доступа может обеспечить одновременное подключение до девяти пользователей. При этом можно гибко задействовать пропускную способность: с равным разделением или пре-

доставлением всего канала одному пользователю в случае необходимости. Например (рис. 3.23):

- для одного клиента может быть выделено 242 поднесущие (234 для данных + 8 пилотных),
- для двух – по 106 (102 + 4 пилотных),
- для четырех – по 52 (48 + 4 пилотных),
- для девяти – по 26 поднесущих (24 + 2 пилотных).

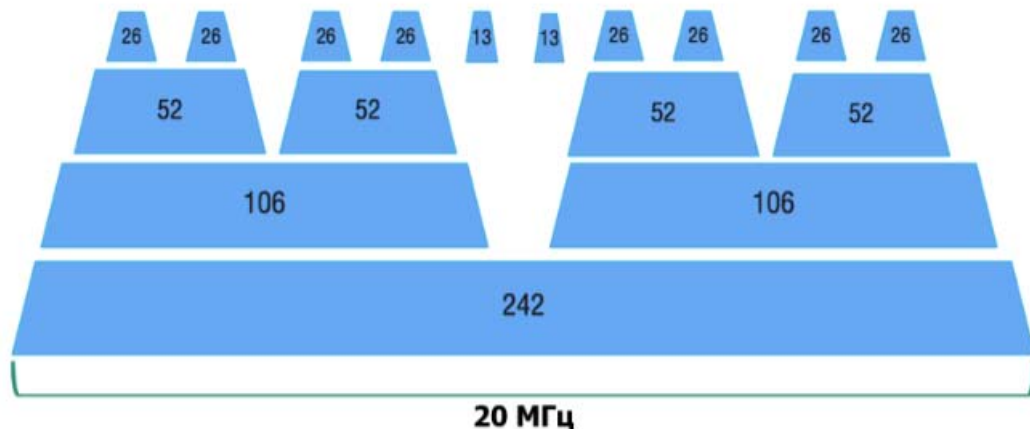


Рисунок 3.23 – Количество поднесущих для разных вариантов разделения канала OFDMA 20 МГц

Канал 40 МГц вмещает 484 поднесущие (278 для данных + 16 пилотных).

Канал 80 МГц вмещает 996 поднесущих (980 для данных + 16 пилотных).

На рисунке 3.24 представлен процесс распределения ресурсов в канале 20 МГц. Канал вмещает 242 поднесущие. Точка доступа 802.11ах может выделить весь канал OFDMA одному клиенту в один момент времени, или разделить канал таким образом, чтобы он мог использоваться несколькими клиентами. Это справедливо как для исходящего трафика, так и для входящего.

Во время первой передачи канал разделяется на два подканала по 106 поднесущих. Эти подканалы используются для параллельной передачи данных пользователям 1 и 2.

Для осуществления второй передачи точка доступа разделяет канал на четыре отдельных подканала с 52 поднесущими и отправляет данные пользователям 3, 4, 5 и 6.

Во время третьей передачи алгоритм OFDMA может задействовать весь канал с 242 поднесущими для пользователя 5.

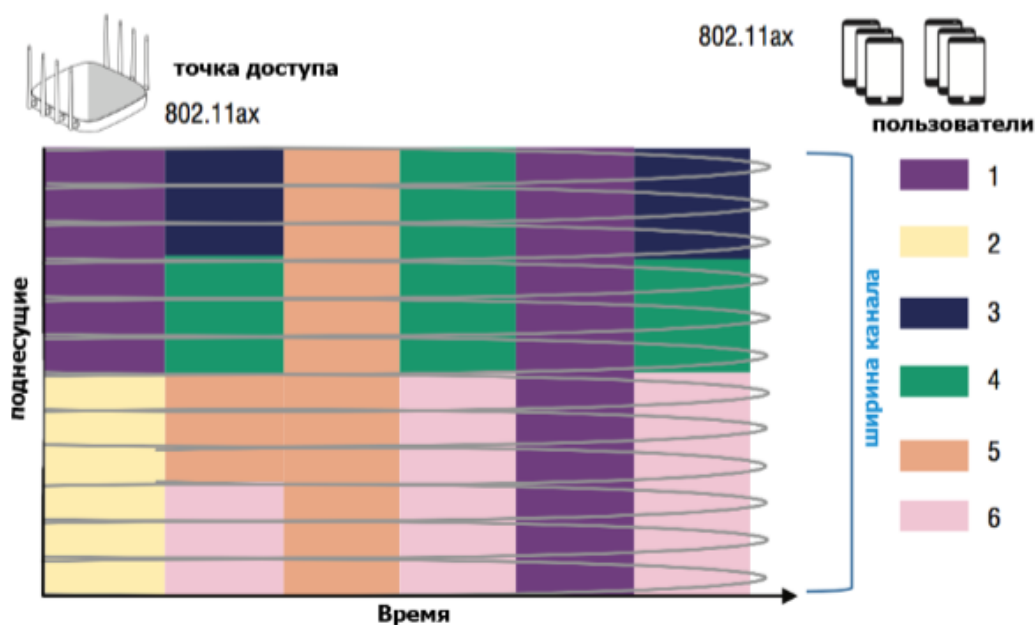


Рисунок 3.24 – Распределение ресурсов в канале OFDMA при работе с несколькими пользователями

Четвертая передача направлена на пользователей 4 и 6 (два подканала по 106 поднесущих), пятая – на пользователя 1, шестая передача разделяет канал между пользователями 3,4 и 6.

Без OFDMA каждая передача была бы направлена только к одному пользователю, независимо от объема передаваемых данных. Таким образом, OFDMA позволяет более эффективно задействовать весь канал 20 МГц при работе с несколькими пользователями.

Если используется канал 40 МГц, технология OFDMA позволяет обеспечить одновременное подключение до 18 клиентов, в канале 80 МГц – до 37 клиентов, а в канале 160 МГц – до 74. Разумеется, это экстремальное использование ресурсов одной точки доступа и оно применяется очень редко. Вместе с тем максимальная емкость в пересчете на одну точку доступа может пригодиться для подключения устройств интернета вещей, не требующих большой скорости подключения.

Еще одно улучшение, внесенное разработчиками, – использование 1024 позиционной квадратурно-амплитудной модуляции (1024-QAM). Это позволяет передавать 10 бит в одном символе, а значит, увеличить информационную скорость на 25% в сравнении с 256-QAM в стандарте 802.11ac.

Вычислим максимальную информационную скорость в канале 20 МГц. Будем считать, что точка доступа взаимодействует с одним клиентом, т.е. используется весь канал с 242 поднесущими, из которых только 234 используются для передачи информации. При использовании 1024-QAM емкость одного OFDM-символа составит:

$$234 \cdot 10 = 2340 \text{ бит.}$$

Время передачи одного символа составляет 12,8 мкс (что в 4 раза больше, чем в стандартах 802.11a/g/n/ac). Величина охранного интервала GI может составлять 3,2 / 1,6 / 0,8 мкс (последнее значение для помещений). Если GI = 0,8 мкс, то длительность OFDM-символа будет минимальной и составит 13,6 мкс, что соответствует символной скорости

$$1 / 13,6 \text{ мкс} = 73\,539 \text{ символов/с.}$$

Определим битовую скорость

$$N = 2340 \cdot 73539 = 172 \text{ Мбит/с.}$$

Не все биты являются информационными. Если используется сверточный кодер  $R = 5/6$ , то информационная скорость составит

$$N_{\text{инф}} = 172 \cdot 5 / 6 = 143,3 \text{ Мбит/с (в канале 20 МГц).}$$

В канале 40 МГц используется ровно в 2 раза больше поднесущих, поэтому наибольшая скорость (при использовании 1024-QAM, минимальном охранном интервале GI = 0,8 мкс и скоростью сверточного кодирования  $R = 5/6$ ) также будет ровно в 2 раза больше, нежели в канале 20 МГц, и составит

$$N_{\text{инф}} = 2 \cdot 143,3 = 286,6 \text{ Мбит/с (в канале 40 МГц).}$$

В канале 80 МГц используется 980 поднесущих для передачи данных. Следовательно, наибольшая скорость (при использовании 1024-QAM, минимальном охранном интервале GI = 0,8 мкс и скоростью сверточного кодирования  $R = 5/6$ ) составляет

$$N_{\text{инф}} = 980 \cdot 10 \cdot 73539 \cdot 5 / 6 = 600,5 \text{ Мбит/с (в канале 80 МГц).}$$

В канале 160 МГц максимальная информационная скорость составляет 1201 Мбит/с. Если при этом используется 8 пространственных каналов MIMO, то теоретически в сети 802.11ax можно передавать информацию со скоростью  $8 \cdot 1201 \text{ Мбит/с} = 9,6 \text{ Гбит/с}$ .

Еще одной особенностью стандарта 802.11ax является механизм окрашивания сетевых пакетов – «BSS Color». В стандарте Wi-Fi 6 беспроводные устройства смогут идентифицировать сигналы от перекрывающихся сетей и на основе этой информации предотвращать конфликтные ситуации. Для того чтобы отличать пакеты от разных сетей, в стандарте ввели новое понятие «цветного» идентификатора – Color Code. Если беспроводные устройства работают на одном и том же канале, они могут передавать в кадре 802.11ax данные с уникальным Color Code BSS, и если идентификаторы совпадают, они смогут обмениваться данными в радиоэфире в одно и то же время, без

ожидания. Если обнаруженный кадр имеет другой идентификатор Color Code BSS, устройство его проигнорирует. Механизм «BSS Color» выполняет маркировку пакетов в каналах с целью распознавания «свой-чужой». Ранее этот механизм не поддерживался, поэтому если какое-то устройство производило передачу, то другие устройства, работающие на том же канале, ожидали своей очереди независимо от того, к какой сети относится передающее устройство – к своей или к чужой. Это приводило к падению скорости передачи и увеличению времени ожидания в сетях с большим количеством устройств.

### **Вопросы для самопроверки:**

1. Почему в качестве расширяющей последовательности в стандарте 802.11b выбрана последовательность Баркера размером именно 11-чипов?
2. Какие величины являются элементами комплементарной последовательности?
3. Какие скорости передачи информации доступны при использовании ССК?
4. Что такое UNII?
5. Для чего используется пунктурный кодер в схеме RBCC?
6. Какие частоты являются ортогональными?
7. Для чего необходим охранный интервал?
8. Сколько ортогональных поднесущих используется в стандарте 802.11a?
9. Сколько бит можно передать в одном символе при использовании 64-QAM?
10. Что характеризует параметр «скорость сверточного кодирования»?
11. Какие возможности дает механизм «BSS Color»?
12. Что такое «beamforming» и какие преимущества обеспечивает?

## 4. Взаимодействие узлов в сетях стандарта IEEE 802.11

Стандартом 802.11 определяются два основных типа архитектуры сетей (их часто называют режимами работы сети):

- Ad Hoc
- Infrastructure Mode

### 4.1. Архитектура «Ad Hoc»

В режиме Ad Hoc (рис. 4.1), который называют также IBSS (Independent Basic Service Set) или Peer to Peer (точка-точка), станции непосредственно взаимодействуют друг с другом. Для этого режима требуется минимум оборудования – каждая станция должна быть оснащена беспроводным адаптером. При такой конфигурации не требуется создания какой-либо сетевой инфраструктуры.

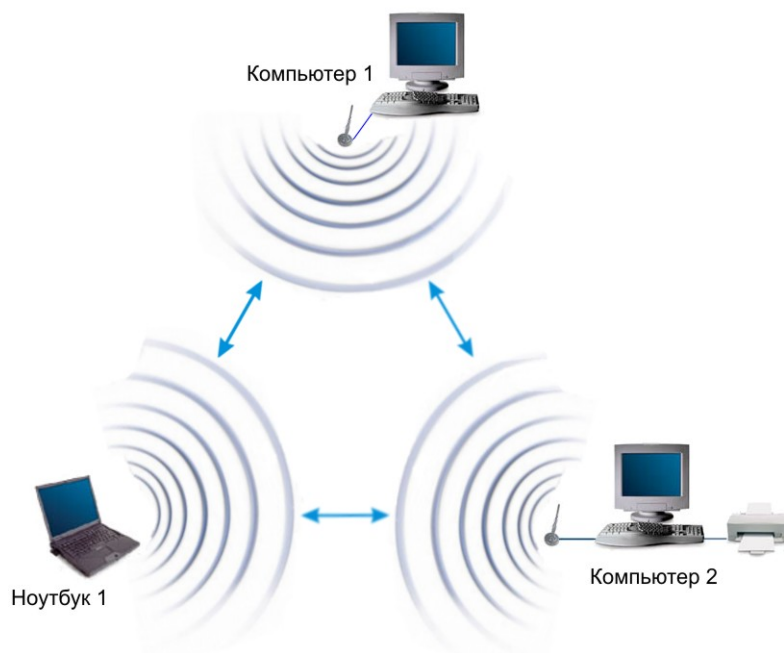


Рисунок 4.1 – Архитектура Ad Hoc

Основными недостатками режима Ad Hoc являются:

- ограниченный радиус действия;
- невозможность использования WPA/WPA2 шифрования (только WEP);
- невозможность подключения к внешней сети, например, к Интернету (без дополнительных аппаратных и/или программных средств);
- ограничение допустимого количества узлов сети – не более 256.

Кроме того, стандарт 802.11g не разрешает устройствам сети взаимодействовать на скоростях более 11 Мбит/с в режиме Ad Hoc, однако некоторые производители сетевого оборудования это ограничение обходят.

Таким образом, архитектура Ad Hoc обычно используется для создания временных сетей.

## 4.2. Архитектура «Infrastructure Mode»

В режиме Infrastructure Mode (рис. 4.2) станции взаимодействуют друг с другом не напрямую, а через точку доступа (Access Point, AP), которая выполняет в беспроводной сети роль концентратора. Рассматривают два режима взаимодействия с точками доступа:

- BSS (Basic Service Set);
- ESS (Extended Service Set).

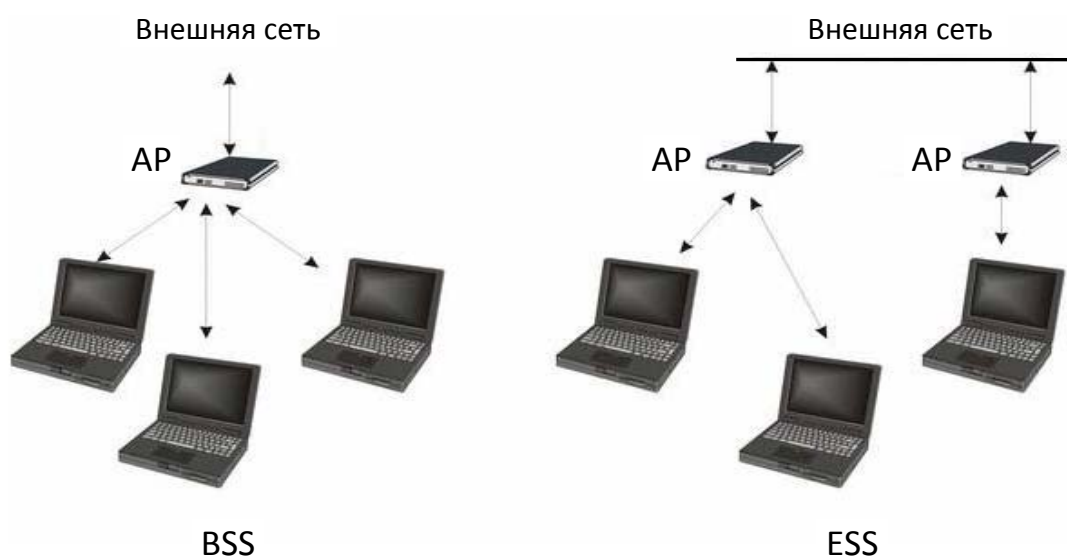


Рисунок 4.2 – Инфраструктурный режим

В режиме BSS все станции связываются между собой только через точку доступа, которая может выполнять также функцию моста с внешней сетью. В расширенном режиме (ESS) существует инфраструктура нескольких сетей BSS, причем сами точки доступа взаимодействуют друг с другом, что позволяет передавать трафик от одной BSS к другой. Точки доступа могут соединяться между собой с помощью:

- сегментов кабельной сети;
- радиомостов.

## 4.3. Модели доступа к среде передачи данных

На MAC-уровне (или подуровне MAC канального уровня модели OSI) устанавливаются правила совместного использования разделяемой среды передачи данных несколькими узлами беспроводной сети.

На MAC-уровне протокола 802.11 определяются две модели коллективного доступа к среде:

- функция распределенной координации (Distributed Coordination Function, DCF);
- функция централизованной координации (Point Coordination Function, PCF).

Рассмотрим более подробно каждый из этих механизмов.

### Функция распределенной координации (DCF)

Передача данных с использованием функции распределенной координации (DCF) основана на методе коллективного доступа с обнаружением несущей и механизмом предотвращения коллизий (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA). При такой организации каждый узел, прежде чем начать передачу, должен прослушать среду, пытаясь обнаружить несущий сигнал.

Стандарт предусматривает два механизма контроля активности в канале (обнаружения несущей):

- физический;
- виртуальный.

Первый механизм реализован на физическом уровне и сводится к определению уровня сигнала в антенне и сравнению его с пороговой величиной.

Виртуальный механизм обнаружения несущей основан на том, что в передаваемых кадрах данных, а также в управляющих кадрах ACK, RTS и CTS содержится информация о времени, необходимом для передачи пакета (или группы пакетов) и получения подтверждения. Таким образом, все устройства сети получают информацию о текущей передаче и могут определить, сколько времени канал будет занят.

Только при условии, что среда свободна, узел может начать передачу данных. В этом случае велика вероятность возникновения коллизий: когда два или более узлов сети одновременно (или почти одновременно) решат, что среда свободна, и начнут передавать данные. Чтобы снизить вероятность возникновения коллизий, используется механизм их предотвращения (Collision Avoidance, CA).

Суть механизма Collision Avoidance заключается в следующем. Каждый узел сети, убедившись, что среда свободна, прежде чем начать передачу, выжидает в течение определенного промежутка времени. Этот промежуток является случайным и складывается из двух составляющих: обязательного



промежутка DIFS (DCF Interframe Space) и выбираемого случайным образом промежутка обратного отсчета (Backoff Time). В результате каждый узел сети перед началом передачи выжидает в течение случайного промежутка времени, что значительно снижает вероятность возникновения коллизий (вероятность того, что два узла сети будут выжидать в течение одного и того же промежутка времени, весьма мала).

Для выбора промежутка обратного отсчета (Backoff Time) каждый узел сети формирует так называемое окно конкурентного доступа (Contention Window, CW). Оно используется для определения количества тайм-слотов фиксированной длительности, которые станция должна отсчитать перед передачей.

Количество тайм-слотов (таймер отсрочки) – это случайное целое число, равномерно распределенное на интервале  $[0, CW]$ , причем значение CW находится в пределах:

$$CW_{\min} \leq CW \leq CW_{\max},$$

причем  $CW_{\max} = 1023$ , а  $CW_{\min}$  зависит от варианта физического уровня (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Параметры MAC-уровня стандарта 802.11

Параметр	Вариант физического уровня			
	FHSS	IR	DSSS	OFDM
$CW_{\min}$	15	63	31	15
$CW_{\max}$	1023			
SlotTime	50 мкс	8 мкс	20 мкс	9 мкс
SIFS	28 мкс	10 мкс	10 мкс	16 мкс
DIFS (DIFS = SIFS + 2·SlotTime)	128 мкс	26 мкс	50 мкс	34 мкс
PIFS (PIFS = SIFS + 1·SlotTime)	78 мкс	18 мкс	30 мкс	25 мкс

При первой передаче, а также каждый раз после успешной передачи кадра, таймер отсрочки выбирается на минимальном интервале  $[0, CW_{\min}]$ .

Таким образом, промежуток обратного отсчета определяется по формуле:

$$\text{Backoff Time} = \text{Random} [0, CW] \cdot \text{SlotTime},$$

где SlotTime – длительность тайм-слота.

Длительность тайм-слота также определяется вариантом физического уровня и выбирается таким образом, чтобы он превосходил время распространения сигнала между любыми двумя станциями сети плюс время, затра-

чиваемое станцией на распознавание занятости среды (таблица 4.1). Если такое условие соблюдается, то любая станция сети сумеет правильно распознать начало передачи кадра при прослушивании среды в начале каждого тайм-слота на интервале отсрочки. Это означает, что коллизия может иметь место только в том случае, когда несколько станций выбирают один и тот же слот для передачи.

Итак, когда узел сети пытается получить доступ к среде передачи данных, то после обязательного промежутка ожидания DIFS, если среда все еще свободна, запускается процедура обратного отсчета, то есть включается обратный отсчет тайм-слотов, составляющих Backoff Time.

В начале каждого тайм-слота узел прослушивает среду. Если среда свободна, то из значения таймера отсрочки вычитается 1. Если в течение всего промежутка ожидания среда оставалась свободной, а счетчик обратного отсчета дошел до нуля, узел начинает передачу (рис. 4.3).

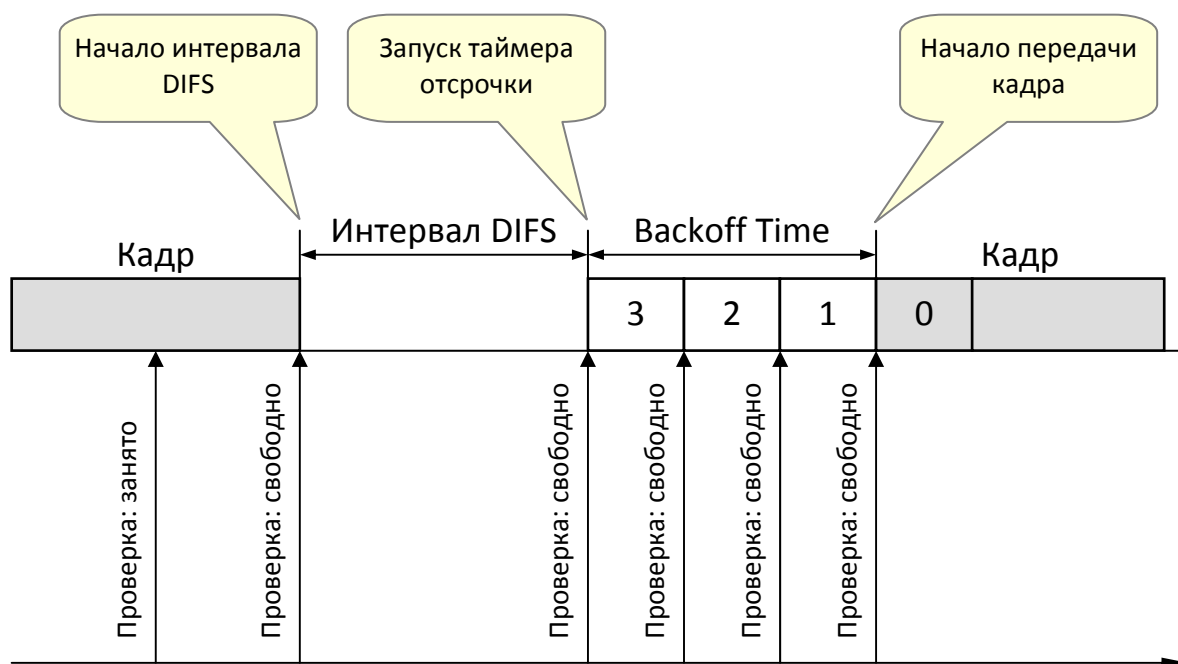


Рисунок 4.3 – Порядок доступа к среде в режиме DCF

После успешной передачи окно CW формируется вновь. Если же за время ожидания передачу начал другой узел сети, то значение счетчика обратного отсчета **замораживается**, и передача данных откладывается. После того как среда станет свободной, после обязательного интервала DIFS данный узел снова начинает процедуру обратного отсчета начиная с **замороженного** значения таймера отсрочки, т.е. с меньшим временем ожидания.

Очевидно, что чем большее число раз узел откладывает передачу по причине занятости среды, тем выше вероятность того, что в следующий раз он получит доступ к среде передачи данных (рис. 4.4).

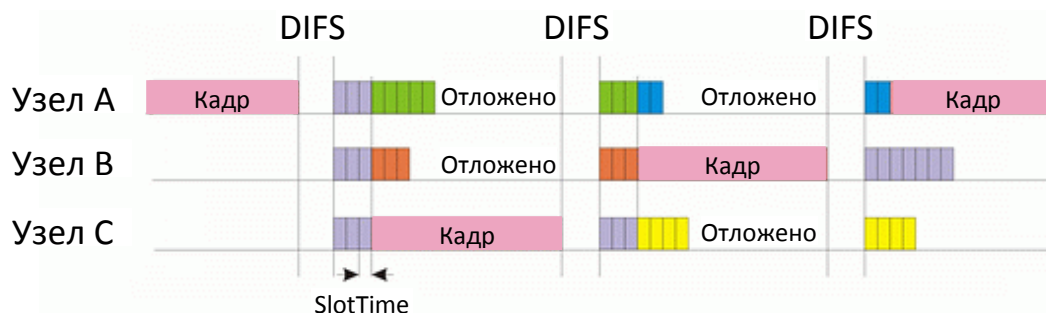


Рисунок 4.4 – Реализация равноправного доступа к среде в методе DCF

Рассмотренный алгоритм реализации коллективного доступа к среде передачи данных гарантирует равноправный доступ всех узлов сети к среде.

Однако при таком подходе вероятность возникновения коллизий хотя и мала, но все-таки существует. Снизить вероятность возникновения коллизий можно путем увеличения размера формируемого окна  $CW$ . В то же время это увеличит времена задержек при передаче и тем самым снизит производительность сети. Поэтому в методе DCF для минимизации коллизий используется следующий алгоритм. После каждого успешного приема кадра принимающая сторона через короткий промежуток SIFS (Short Interframe Space) подтверждает успешный прием, посылая ответную квитанцию – кадр ACK (ACKnowledgement) (рис. 4.5).

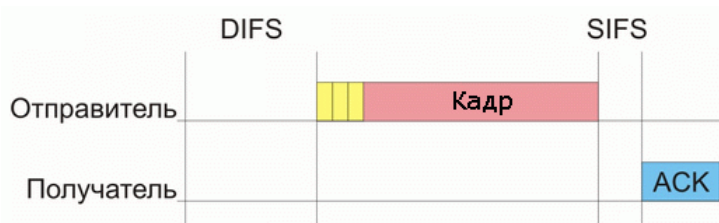


Рисунок 4.5 – Отправка квитанции после успешного приема кадра

Если в процессе передачи данных возникла коллизия, то передающая сторона не получает кадр ACK об успешном приеме. В этом случае размер  $CW$ -окна для передающего узла увеличивается вдвое:

$$CW_i = 2 \cdot CW_{i-1} + 1.$$

Для каждой  $i$ -й передачи (если все предыдущие оказались безуспешными) размер  $CW$ -окна будет увеличиваться по этому правилу, пока не достигнет максимума ( $CW_{\max} = 1023$ ).

Например, если для первой передачи размер окна равен 31 слоту, то для второй попытки передачи он уже составляет 63 слота, для третьей – 127 слотов, для четвертой – 255, для пятой – 511, а для всех последующих – 1023 слота.

Как и в методе CSMA/CD, количество неудачных попыток передачи одного кадра ограничено, но стандарт 802.11 не дает точного значения этого верхнего предела. Когда верхний предел в N попыток достигнут, кадр отбрасывается, а счетчик последовательных коллизий устанавливается в нуль. Этот счетчик также устанавливается в нуль, если кадр после некоторого количества неудачных попыток все же передается успешно.

Таким образом, увеличение размера окна происходит динамически по мере роста числа коллизий, что позволяет, с одной стороны, уменьшить временные задержки и, с другой стороны, снизить вероятность возникновения коллизий.

В беспроводных сетях возможна ситуация, когда два устройства (А и В) удалены и не слышат друг друга, однако оба попадают в зону охвата третьего устройства С – так называемая проблема скрытого терминала (рис. 4.6). Если оба устройства А и В начнут передачу, то они принципиально не смогут обнаружить конфликтную ситуацию и определить, почему пакеты не проходят.



Рисунок 4.6 – Проблема скрытого терминала

В режиме доступа DCF применяются меры для устранения эффекта скрытого терминала. Для этого станция, которая хочет захватить среду и в соответствии с описанным алгоритмом начинает передачу кадра в определенном слоте, вместо кадра данных сначала посылает станции назначения короткий служебный кадр RTS (Request To Send – запрос на передачу). На этот запрос станция назначения должна ответить служебным кадром CTS (Clear To Send – свободна для передачи), после чего станция-отправитель посылает кадр данных (рис. 4.7). Кадр CTS должен оповестить о захвате среды те станции, которые находятся вне зоны сигнала станции-отправителя, но в зоне досягаемости станции-получателя, то есть являются скрытыми терминалами для станции-отправителя.

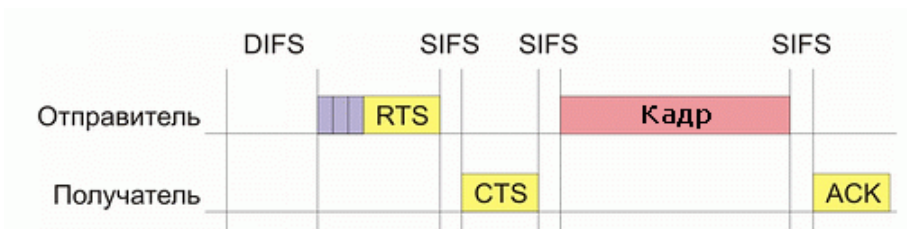


Рисунок 4.7 – Алгоритм RTS/CTS

Максимальная длина кадра данных 802.11 равна 2346 байт, длина RTS-кадра – 20 байт, CTS-кадра – 14 байт. Так как кадры RTS и CTS гораздо короче, чем кадр данных, потери данных в результате коллизии RTS- или CTS-кадров гораздо меньше, чем при коллизии кадров данных.

Процедура обмена RTS- и CTS-кадрами не обязательна. От нее можно отказаться при небольшом трафике, поскольку в такой ситуации коллизии случаются редко, а значит, не стоит тратить дополнительное время на выполнение процедуры обмена RTS- и CTS-кадрами.

#### Функция централизованной координации (PCF)

Рассмотренный механизм распределенной координации DCF является базовым для протоколов 802.11 и может использоваться как в режиме Ad-Hoc, так и Infrastructure Mode.

Однако для сетей в режиме Infrastructure Mode более естественным является несколько иной механизм регламентирования коллективного доступа, известный как функция централизованной координации (Point Coordination Function, PCF). Механизм PCF является опциональным и применяется только в сетях с точкой доступа. При использовании механизма PCF точка доступа является центром координации (Point Coordinator, PC). Центр координации управляет коллективным доступом всех остальных узлов сети к среде передачи данных на основе определенного алгоритма опроса или исходя из приоритетов узлов сети. Для этого центр координации опрашивает все узлы сети, внесенные в его список, и на основании этого опроса организует передачу данных между всеми узлами сети.

Такой подход, разумеется, полностью исключает конкурирующий доступ к среде, как в случае механизма DCF, и делает невозможным возникновение коллизий, а для зависимых от времени приложений гарантирует приоритетный доступ к среде.

Функция централизованной координации не отрицает функцию распределенной координации, а дополняет ее. В сетях с механизмом PCF реализуется как механизм PCF, так и традиционный механизм DCF. В течение определенного промежутка времени реализуется механизм PCF, затем – DCF, а

потом все повторяется заново. Чтобы иметь возможность чередовать режимы PCF и DCF, центр координации должен иметь приоритетный доступ к среде передачи данных. Это можно сделать, если разрешить точке доступа использовать промежуток ожидания, меньший DIFS. Промежуток ожидания, определяемый для центра координации, называется PIFS (PCF Interframe Space), причем:

$$\text{SIFS} < \text{PIFS} < \text{DIFS}.$$

Длительность интервалов SIFS, PIFS и DIFS зависит от варианта физической среды (таблица 4.1), но друг от друга они отличаются на величину тайм-слота:

$$\text{PIFS} = \text{SIFS} + \text{SlotTime},$$

$$\text{DIFS} = \text{SIFS} + 2 \cdot \text{SlotTime} = \text{PIFS} + \text{SlotTime}.$$

Межкадровый интервал SIFS имеет наименьшее значение, он служит для первоочередного захвата среды ответными CTS-кадрами или квитанциями, которые продолжают или завершают уже начавшуюся передачу кадра.

В промежутке между завершением PIFS и DIFS центр координации может захватить среду и передать специальный кадр-маячок (beacon), который говорит всем станциям, что начинается контролируемый период (CFP – Contention-Free Period). Получив этот кадр, станции, которые хотели бы воспользоваться алгоритмом DCF для захвата среды, уже не могут этого сделать, они должны дожидаться окончания контролируемого периода (рис. 4.8).

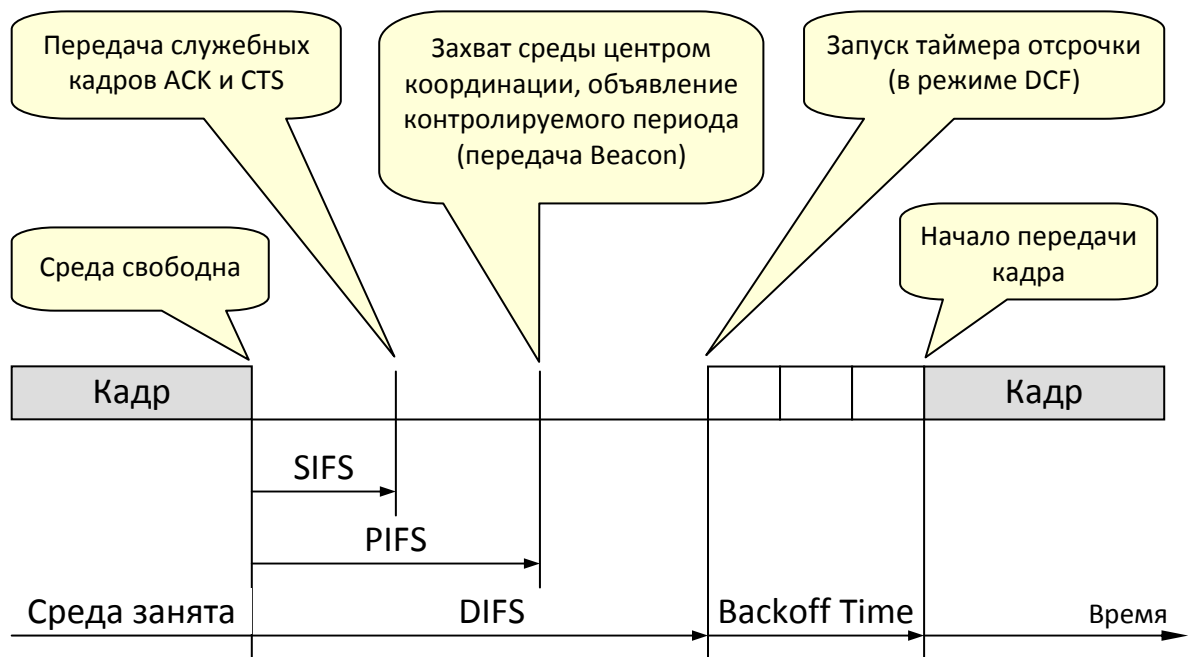


Рисунок 4.8 – Сосуществование режимов DCF и PCF

В контролируемый период центр координации выполняет процедуру опроса, чтобы по очереди предоставить каждой станции право на использование среды, направляя ей специальный кадр. Станция, получив такой кадр, может ответить другим кадром, который подтверждает прием специального кадра и одновременно передает данные. Длительность контролируемого периода ограничена. После его окончания координатор передает соответствующий кадр и начинается неконтролируемый (CP – Contention Period) период.

Режимы PCF и DCF объединяются в суперфрейм, который образуется из контролируемого периода (CFP) и периода конкурентного доступа (CP) к среде (рис. 4.9).

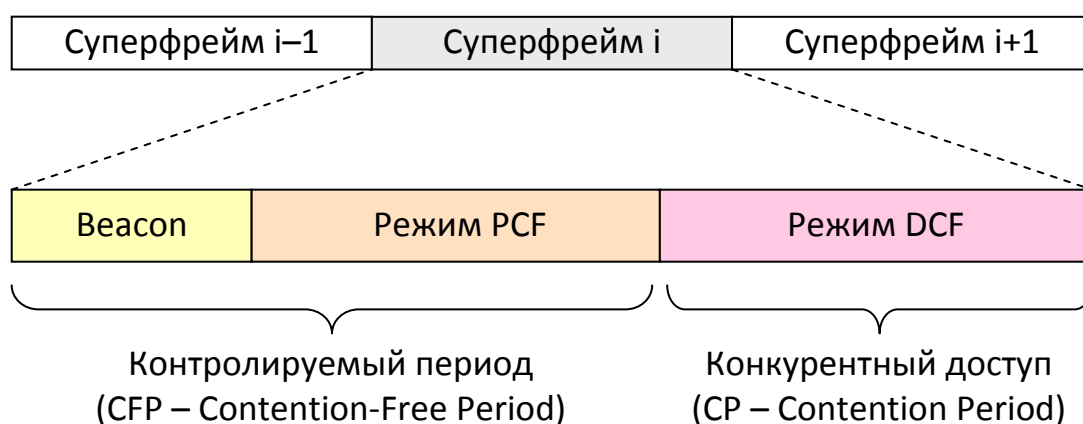


Рисунок 4.9 – Объединение режимов PCF и DCF в одном суперфрейме

#### 4.4. Режимы работы точки доступа

Современные точки доступа являются многофункциональными устройствами и, как правило, могут быть настроены для работы в следующих режимах:

- Access Point;
- WDS (Wireless Distribution System);
- WDS with AP (WDS with Access Point).

«Access Point» – это *обычный* вариант использования точки доступа, при котором она подключается к проводной сети, обеспечивая беспроводным клиентам доступ к проводной инфраструктуре (рис. 4.2).

Другие режимы рассмотрим более подробно.

##### Режим WDS

WDS (Wireless Distribution System) – «распределенная беспроводная система». В этом режиме точки доступа соединяются только между собой,

образую мостовое соединение. При этом каждая точка может соединяться с несколькими другими точками. Все точки в этом режиме должны использовать одинаковый канал, поэтому количество точек, участвующих в образовании моста, не должно быть чрезмерно большим. Подключение клиентов осуществляется только по проводной сети через uplink-порты точек доступа (рис. 4.10).

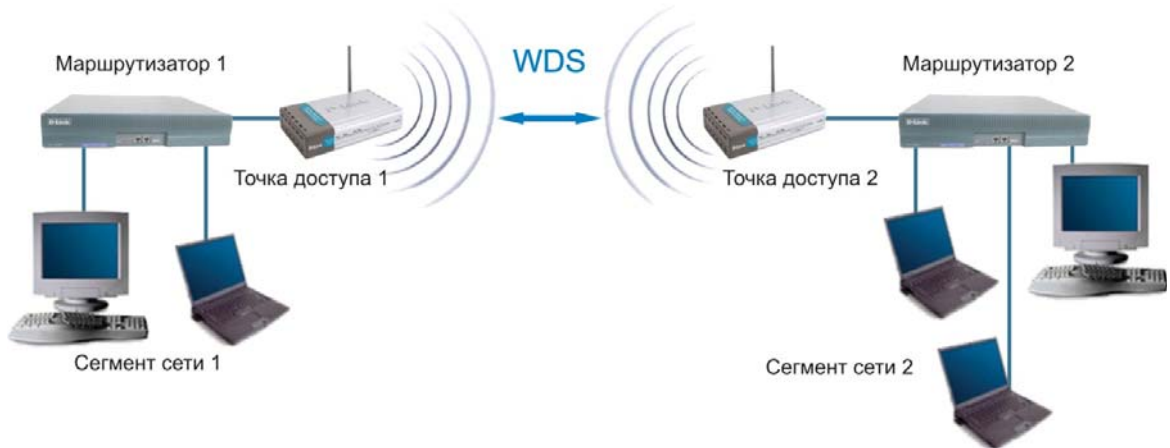


Рисунок 4.10 – Режим беспроводного моста (WDS)

Режим беспроводного моста, аналогично проводным мостам, служит для объединения подсетей в общую сеть. С помощью беспроводных мостов можно объединять проводные локальные сети, находящиеся как на небольшом расстоянии в соседних зданиях, так и на расстояниях до нескольких километров. Это позволяет объединить в сеть филиалы и центральный офис, а также подключать клиентов к сети провайдера Интернет (рис. 4.11).

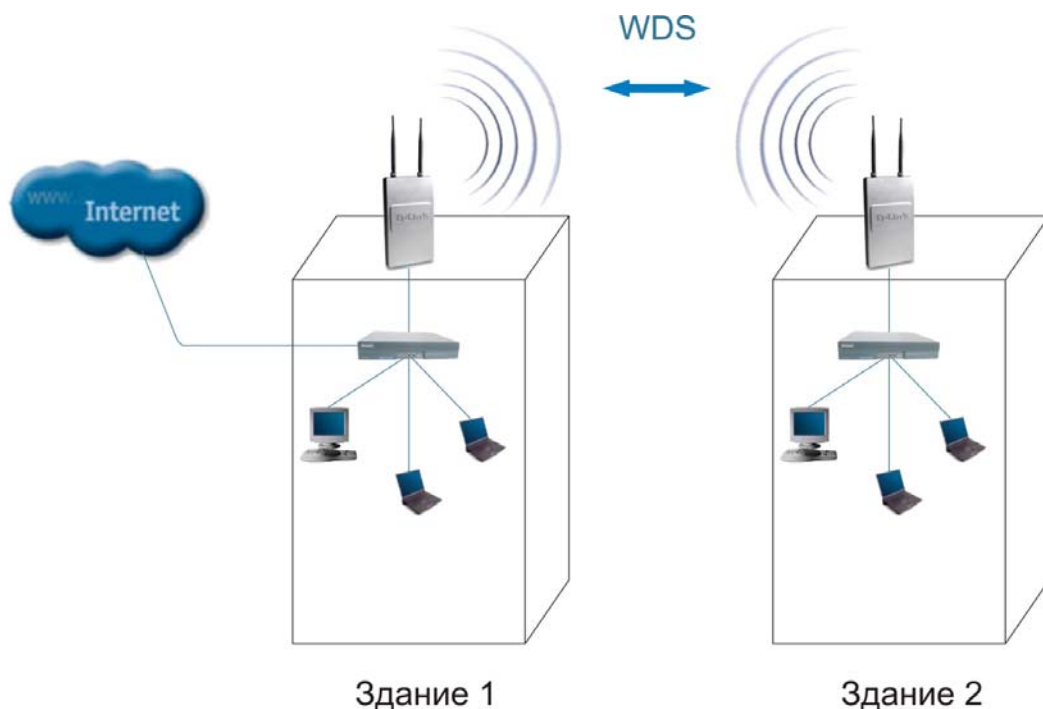


Рисунок 4.11 – Беспроводной мост между зданиями



Беспроводный мост может использоваться там, где прокладка кабеля между зданиями нежелательна или невозможна. Данное решение позволяет достичь значительной экономии средств и обеспечивает простоту настройки и гибкость конфигурации при перемещении офисов.

К точке доступа, работающей в режиме моста, подключение беспроводных клиентов невозможно. Беспроводная связь осуществляется только между парой точек, реализующих мост.

### Режим WDS with AP

WDS with Access Point – «распределенная беспроводная система с точкой доступа». С помощью этого режима можно организовать не только мостовую связь между точками доступа, но и одновременно подключить клиентские компьютеры (рис. 4.12).

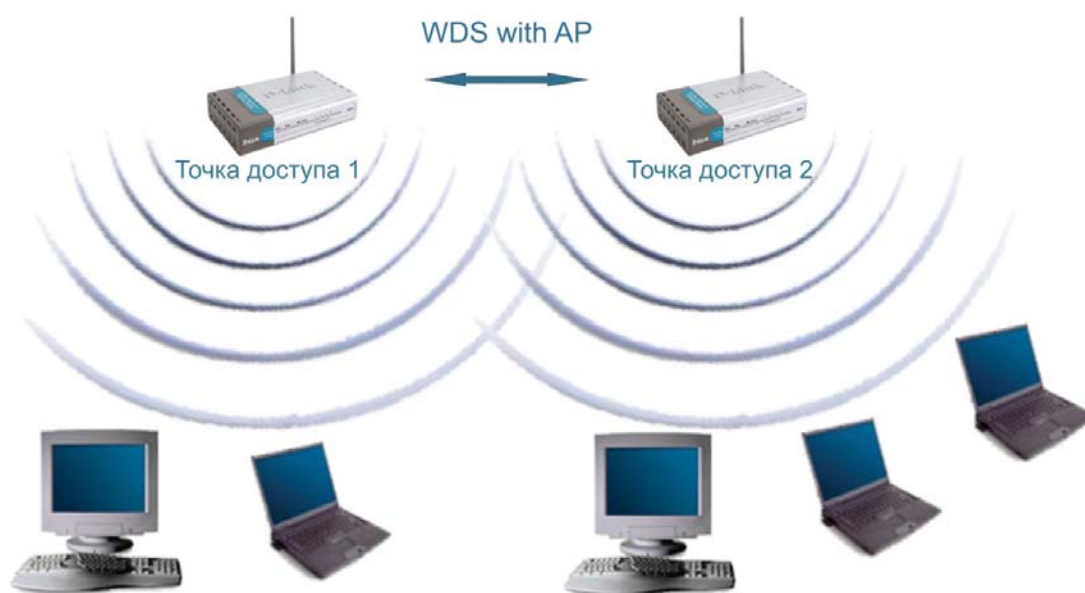


Рисунок 4.12 – Режим WDS with AP

Это позволяет достичь существенной экономии оборудования и упростить топологию сети. Данная технология поддерживается большинством современных точек доступа.

Поскольку все устройства в составе одной WDS with AP работают на одной частоте и создают взаимные помехи, это ограничивает количество клиентов до 15-20 узлов. Для увеличения количества подключаемых клиентов можно использовать несколько WDS-сетей, настроенных на разные неперекрывающиеся каналы и соединенные проводами через uplink-порты.

Используя режим WDS при объединении локальных сетей филиалов можно построить корпоративную сеть различных топологий, например, «шина», «кольцо» или «звезда».

## 4.5. Формат кадра подуровня MAC стандарта 802.11

В сетях 802.11 используются кадры трех типов:

- информационные кадры;
- контрольные кадры;
- кадры управления.

На рисунке 4.13 изображена структура информационного кадра.

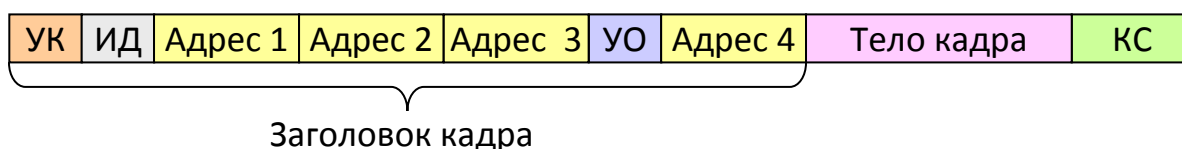


Рисунок 4.13 – Формат информационного кадра стандарта IEEE 802.11

Рассмотрим назначение полей кадра:

- *УК* (2 байта) – управление кадром (указывается тип кадра и предоставляется управляющая информация);
- *ИД* (2 байта) – идентификатор длительности (если используется поле длительности, указывается время (в микросекундах), на которое требуется выделить канал для успешной передачи кадра MAC);
- *Адреса* (по 6 байт) – число и значение полей адреса зависит от контекста (возможны следующие типы адреса: назначения, источника, передающей базовой станции, принимающей базовой станции);
- *УО* (2 байта) – управление очередностью (используется для фрагментации и повторной сборки кадров);
- *Тело кадра* (0 – 2312 байт) – содержит модуль данных протокола LLC или управляющая информация (режима PCF);
- *КС* (4 байта) – «контрольная сумма» – циклическая проверка четности с избыточностью (CRC32).

Кадры управления имеют сходный формат, только там отсутствуют адреса базовых станций, поскольку эти кадры не покидают беспроводной сегмент сети. Кадры управления используются для управления связью станций и точек доступа. *Подтип* указывается в поле *УК* (управление кадром). Стандарт определяет 11 подтипов, например:

- *Запрос ассоциации*. Посылается станцией к точке доступа с целью запроса ассоциации с данной сетью с базовым набором услуг (BSS). Кадр включает информацию о возможностях, например, будет ли использоваться шифрование, или способна ли станция отвечать при опросе.

- *Ответ на запрос ассоциации.* Возвращается точкой доступа и указывает, что запрос ассоциации принят.
- *Сигнальный кадр.* Передается периодически, позволяет мобильным станциям локализовать и идентифицировать BSS.

В контрольных кадрах отсутствуют поля «Тело кадра» и «УО», ключевым является *подтип* (6 возможных значений), например (рис. 4.14):

- *Запрос передачи (RTS).*
- *«Готов к передаче» (CTS).*
- *Подтверждение (ACK).*

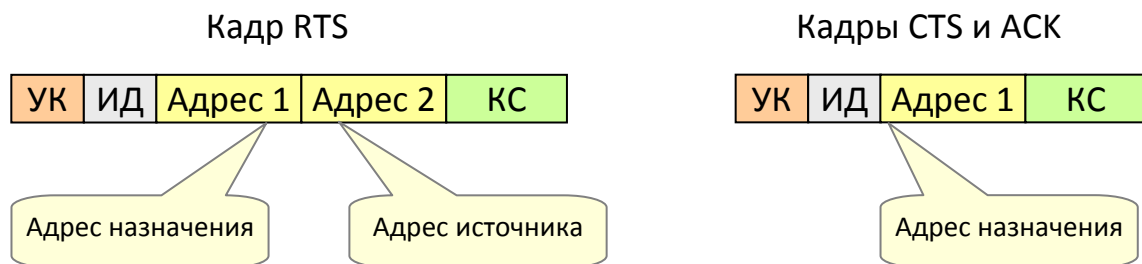


Рисунок 4.14 – Формат контрольных кадров RTS, CTS, ACK

### Вопросы для самопроверки:

1. Какой метод доступа к среде передачи используется в режиме DCF?
2. Для чего используется механизм «RTS-CTS»?
3. В чем заключается виртуальный механизм обнаружения несущей в эфире?
4. Как формируется промежуток обратного отсчета?
5. Как организовать беспроводной мост между точками доступа?
6. Какие ограничения имеет архитектура «Ad Hoc»?
7. Каково назначение интервала PIFS?
8. Каким образом передающая станция определяет, что кадр доставлен узлу назначения неповрежденным?

## Библиографический список

1. 802.11ac: что нам нужно знать о новом стандарте Wi-Fi // Хабр : сайт. URL: <https://habr.com/ru/post/149806/>. Дата публикации: 18 августа 2012.
2. IEEE 802.15.1-2005. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 15.1a: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks (WPAN)
3. IEEE 802.15.3-2003. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN)
4. IEEE 802.15.3-2016. IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks
5. IEEE 802.15.4-2003. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)
6. IEEE 802.15.4-2015. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks
7. IEEE 802.11a-1999. IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems – LAN/MAN Specific Requirements – Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band
8. IEEE 802.11b-1999. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and Metropolitan networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz band
9. IEEE 802.11g-2003. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band
10. IEEE 802.11n-2009. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput
11. IEEE 802.11ac-2013. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and

metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz.

12. IEEE 802.11ax-2021. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN
13. Wi-Fi 6: что у 802.11ax внутри // Хабр : сайт. URL: <https://habr.com/ru/article/449116/>. Дата публикации: 23 апреля 2019.
14. Алексеев, В. Параметры Wi-Fi-оборудования, разрешенного для использования в Российской Федерации / В. Алексеев // Беспроводные технологии. – 2011. – № 1(22). – С. 22-29.
15. Архипкин, В.Я. Bluetooth. Технические требования. Практическая реализация. Приложения. / В.Я. Архипкин, А.В. Архипкин. – М.: Мобильные коммуникации, 2004 – 216 с.
16. Беспроводные сети WI-FI / А. В. Пролетарский, И. В. Баскаков, Д. Н. Чирков [и др.]. – Москва : Интернет-университет информационных технологий, 2007. – 215 с.
17. Варгаузин, В. Д. Радиосети для сбора данных от сенсоров, мониторинга и управления на основе стандарта IEEE 802.15.4 / В. Д. Варгаузин // ТелеМультиМедиа. – 2005. – No 6(34). – С. 23 – 27.
18. Гейер, Д. Беспроводные сети. Первый шаг / Д. Гейер ; Джим Гейер ; [пер. с англ. и ред. В. С. Гусева]. – М. [и др.] : Вильямс, 2005. – 191 с.
19. Денисов Д. «Эффективный» Wi-Fi 802.11ax (часть 1): изменения на уровне MAC // Nag : сайт. - URL: <https://nag.ru/material/32400>. Дата публикации: 04 июня 2018.
20. Денисов Д. Обзор технологии Wi-Fi // Nag : сайт. URL: <https://nag.ru/material/35534>. Дата публикации: 19 июля 2019.
21. Комагоров В.П. Архитектура сетей и систем телекоммуникаций: учебное пособие / В.П. Комагоров. – Томск: Изд. Томского политехнического университета, 2011. – 154 с.
22. Леонов В. Беспроводные сети – как это работает // ferra.ru : сайт. URL: <https://www.ferra.ru/review/computers/s25619.htm>. Дата публикации: 07 сентября 2004
23. Ляхов, А. И. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / А. И. Ляхов, И. В. Шахнович ; В.М. Вишневский [и др.] ; Рос. акад. наук, Ин-т проблем передачи информ. – Москва: Техносфера, 2005. – 591 с.

24. Новоселов, В. Особенности Wi-Fi 6 / В. Новоселов // Беспроводные технологии. – 2019. – № 3(56). – С. 6-9.
25. Об утверждении Правил применения оборудования радиодоступа. Часть I. Правила применения оборудования радиодоступа для беспроводной передачи данных в диапазоне от 30 МГц до 66 ГГц : Приказ Минкомсвязи России от 14 сент. 2010 г. № 124: [ред. от 06 июля 2020 г.]. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 13.11.2022)
26. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : Юбилейное издание / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб.: Питер, 2020. – 1008 с.
27. Пахомов С. Протоколы беспроводных локальных сетей // Компьютер Пресс: Электронный журн. 2004, №5. URL: <http://compress.ru/article.aspx?id=10782&iid=435>
28. Пахомов С. Стандарт беспроводной связи IEEE 802.11n // КомпьютерПресс: Электронный журн. 2007, №8. URL: <http://compress.ru/article.aspx?id=17782&iid=822>
29. Проблемы создания IEEE 802.11ax- нового поколения сетей Wi-Fi / А. Г. Кирьянов, А. И. Ляхов, Д. А. Михлина [и др.] // Информационные процессы. – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 1-12.
30. Режим OFDMA: как работает самая важная часть 802.11ax (Wi-Fi 6) // Современные беспроводные решения : сайт. URL: <https://wifi-solutions.ru/rezhim-ofdma-kak-rabotaet-samaya-vazhnaya-chast-80211ax-wi-fi-6/> (дата обращения 13.11.2022)
31. Росс, Д. Wi-Fi. Беспроводная сеть / Д. Росс ; Джон Росс; [пер. с англ. В. А. Ветлужских]. – Москва : NT Press, 2007. – 309 с.
32. Сергиевский М. Беспроводные сенсорные сети // КомпьютерПресс: Электронный журн. 2007, №8. URL: <http://compress.ru/article.aspx?id=17950&iid=831>
33. Технологии современных беспроводных сетей Wi-Fi / Е. В. Смирнова, А. В. Пролетарский, Е. А. Ромашкина [и др.]. – Москва : Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2016. – 448 с.
34. Что такое 802.11ax – обзор нового стандарта WI-FI 6 // Ситком : сайт. URL: <https://www.sit-com.ru/802-11ax-review-wifi6.html>. Дата публикации: 02 ноября 2019.
35. Что такое Beamforming // Ситком : сайт. URL: <https://www.sit-com.ru/what-is-beamforming.html>. Дата публикации: 05 сентября 2019.
36. Что такое MU-MIMO и что это дает конечному пользователю? // Ситком : сайт. URL: <https://www.sit-com.ru/what-is-mu-mimo.html>. Дата публикации. Дата публикации: 14 мая 2021.

37. Шахнович, И. В. Современные технологии беспроводной связи / И. В. Шахнович. – Изд. 2-е, испр. и доп.. – Москва : Техносфера, 2006. – 287 с.
38. Шахнович, И. Беспроводные локальные сети. Анатомия стандартов IEEE 802.11 / И. Шахнович // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2003. – № 1(43). – С. 38-49.
39. Шахнович, И. Беспроводные локальные сети. IEEE-802.11g - G дали! / И. Шахнович // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2003. – № 4(46). – С. 36-39.
40. Шахнович, И. Персональные беспроводные сети стандартов IEEE 802.15.3 и 802.15.4 / И. Шахнович // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2004. – № 6(56). – С. 32-37.
41. Шахнович, И. Стандарт IEEE 802.11n - уж скоро. Примирение непримиримых / И. Шахнович // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2006. – № 1(67). – С. 52-59.