Раздел 7. Локальные беспроводные сети WiFi

Содержание:

Лекция 1. Введение. Обзор стандартов 802.11. Обзор топологий WLAN	.1
Лекция 2. Механизм доступа к среде стандарта 802.11 (уровень МАС)	.8
Лекция 3. Принцип передачи данных в OFDM-системе и физический уровень стандарта IEEE 802.11а-1999 1	17
Лекция 4. Формирование фрейма физического уровня стандарта IEEE 802.11а 2	28
Лекция 5. Беспроводные локальные сети стандарта 802.11. Стандарт 802.11b	39
Лекция 6. Беспроводные локальные сети стандарта 802.11g. Особенности сетей стандарта 802.11n	49

Лекции по стандартам 802.11.

Лекция 1. Введение. Обзор стандартов 802.11. Обзор топологий WLAN.

Литература. Аббревиатура к лекциям по МАС уровню. Обзор стандартов 802.11. Обзор топологий WLAN. Независимые базовые зоны обслуживания (ad-hoc cemu). Базовые зоны обслуживания с точкой доступа. Расширенные зоны обслуживания. Понятие скрытого узла.

Литература.

- 1. Прокис Д. Цифровая связь. Пер. с англ. М: Радио и связь, 2000. 800с.
- 2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с англ. М:, Вильямс, 2003. 1104 с.
- 3. Hanzo L., Munster M., Choi B.J., Keller T. OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting, Wiley, 2003. 980 p.
- 4. Prasad R., van Nee R. OFDM Wireless Multimedia Communications. London: Artech House, 2000.
- 5. Rostan P., Leary J. 802.11 Wireless LAN Fundamentals. Pearson Education, 2003. 281p.
- 6. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition.
- 7. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High speed Physical Layer in the 5 GHz Band. IEEE Standard 802.11a-1999.
- 8. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE Standard 802.11b-1999.
- 9. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band. IEEE Standard 802.11g-2003.

Аббревиатура к лекциям по МАС уровню

ACK (Acknowledgment) - фрейм подтверждения

АР (Access Point) - точка доступа

ATIM (Announcement traffic indication frame) - фрейм индикации объявленного трафика

BSS (basic service set) - базовая зона обслуживания

BSSID (Identification of Basic service set) – идентификация базовой зоны обслуживания

CRC (cyclic redundancy check) - циклический избыточный контроль

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) - множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий

CTS (Clear to send) - фрейм готовности к приему

DCF (Distributed Coordination Function) - распределённая координационная функция

DIFS (Interframe space DCF) – межфреймовый промежуток функции DCF

DS (Distribution System) - распределительная система

IBSS (independent basic service set) - независимая базовая зона обслуживания

IE (information element) - информационный элемент

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) - Институт инженеров по электротехнике и электронике

FF (fixed field) – фиксированное поле

FPS (frame check sequence) - контрольная последовательность (сумма) фрейма

LBT (listen before talk) - прослушивание перед передачей

MAC (Medium Access Control) – уровень управления доступом к среде передачи

NAV (network allocation vector) - вектор распределения сети

NIC (network interface card) - беспроводная сетевая интерфейсная карта

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) - частотное уплотнение с ортогональными поднесущими частотами

PHY (Physical level) – физический уровень

QoS (Quality of service) - качество обслуживания

RTS (Request to send) - фрейм готовности к передаче

SIFS (Short interframe space) - короткий межфреймовый промежуток

SSID (Service set identifier) - идентификатор зоны обслуживания

WEP (Wired Equivalent Privacy) – защищенность, эквивалентная защищенности проводных сетей

WLAN (Wireless Local Area Network) - беспроводные локальные сети

Wi-Fi (Wireless Fidelity)

ESS (extended service set) – расширенная зона обслуживания

ТВТТ (target beacon transmission time) - момент времени передачи маячкового сигнала

1.1. Введение.

Первый стандарт 802.11 Wi-Fi (Wireless Fidelity) на беспроводную передачу данных со скоростью 1 и 2 Мбит/с в нелицензируемом диапазоне частот 2,4 ГГц был ратифицирован в 1997 году. В результате ратификации в 1999 году стандарта 802.11b в этом диапазоне скорость передачи данных поднялась до 11 Мбит/с. Стандарт 802.11a и 802.11g регламентируют скорость передачи данных порядка 54 Мбит/с в частотных диапазоне 5 ГГц. Популярность стандарта 802.11 быстро растет, поскольку он дает возможность работникам оставаться подключенными к сети, даже когда они находятся вне стен офиса. Wi-Fi технология уже сейчас стала стандартной для многих моделей ноутбуков и портативных устройств. На сегодняшний день широко распространены сетевые карты для персональных компьютеров (ПК), позволяющие работать со скоростями от 1 до 54 Мбит/с в обоих частотных диапазонах (2,4 и 5 ГГц) при стоимости меньшей, чем большинство людей платят за мобильный телефон. В настоящее время разрабатываются новые расширения этого стандарта, которые повысят защищенность, обеспечат поддержку стандарта на качество услуг передачи данных (QoS), улучшат управляемость и повысят скорость передачи данных до уровня, превышающего 100 Мбит/с.

Таким образом, на сегодняшний день большинство цифровых систем передачи информации, в частности, беспроводные локальные сети (WLAN – Wireless Local Area Network), строятся на основе стандартов 802.11х, разрабатываемых рабочими группами Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers). Это семейство стандартов специфицирует физический уровень (PHY - Physical level) и уровень управления доступом к среде передачи данных (MAC - Medium Access Control).

С точки зрения пользователя функции и характеристики WLAN-сетей стандарта 802.11 такие же, как и у разделяемых проводных локальных сетей Ethernet стандарта 802.3. Но архитектура стандарта 802.11 является более сложной, так как предполагает работу в неконтролируемой беспроводной среде, вместо контролируемой проводной среды Ethernet.

Набор стандартов 802.11 определяет целый ряд технологий реализации физического уровня (PHY), которые могут быть использованы подуровнем 802.11 МАС. К этому набору относятся:

- Физический уровень стандарта 802.11 со скачкообразной перестройкой частоты (frequency hopping) в диапазоне 2,4 ГГц.
- Физический уровень стандарта 802.11 с расширением спектра методом прямой последовательности (direct sequence) в диапазоне 2,4 ГГц.
- Физический уровень стандарта 802.11b с расширением спектра методом прямой последовательности в диапазоне 2,4 ГГц.
- Физический уровень стандарта 802.11a с разделением по ортогональным частотам (orthogonal frequency division multiplexion, OFDM) в диапазоне 5 ГГц.
- Расширенный физический уровень (extended rate physical (ERP) layer) стандарта 802.11g в диапазоне 2,4 ГГц.
- Физический уровень стандарта 802.11n (как развитие стандарта 802.11a). Основные дополнения, внесенные в стандарт 802.11n по сравнению со стандартом 802.11a. Поддержка МІМО-режима передачи данных в стандарте 802.11n.

Подуровень МАС отвечает за разделение совместно используемого радиоканала между пользователями (терминалами, станциями), а также за обнаружение и, если необходимо, повторную передачу ошибочно принятых пакетов информации (кадров или фреймов). Эта задача решается с помощью специальных алгоритмов доступа к каналу и обмена служебной информацией. Подуровень МАС одинаков для стандартов 802.11. Станции стандарта 802.11 не обладают способностью обнаруживать коллизии, как это делают Ethernet-станции стандарта 802.3, осуществляющие множественный доступ к сети с контролем несущей и обнаружением коллизий. Вследствие этого для доступа к среде необходим более сложный и масштабируемый подуровень МАС при минимальных дополнительных издержках.

1.2. Обзор топологий WLAN.

Сети стандарта 802.11 можно конструировать по-разному. Разработчик может выбрать любую из следующих топологий.

- Независимые базовые зоны обслуживания (independent basic service sets, IBSSs).
- Базовые зоны обслуживания (basic service sets, BSSs).
- Расширенные зоны обслуживания (extended service sets, ESSs).

Зона обслуживания (service set) в данном случае - это логически сгруппированные устройства. Технология WLAN обеспечивает доступ к сети путем передачи широковещательных сигналов через эфир на несущей в диапазоне радиочастот. Принимающая станция может получать сигналы в диапазоне работы нескольких передающих станций. Передающая станция вначале передает идентификатор зоны обслуживания (service set identifier, SSID). Станция-приемник использует SSID для фильтрации получаемых сигналов и выделения того, который ей нужен.

1.2.1. Независимые базовые зоны обслуживания (IBSS).

Сеть Ad-hoc (без применения точек доступа). IBSS представляет собой группу работающих в соответствии со стандартом 802.11 станций, связывающихся непосредственно одна с другой. IBSS также называют специальной или неплановой (*ad-hoc*) сетью, потому что она представляет собой простую одноранговую WLAN. На рис. 1.1 показано, как станции, оборудованные беспроводными сетевыми интерфейсными картами (network interface card, NIC) стандарта 802.11, могут формировать IBSS и напрямую связываться одна с другой.



Рис. 1.1. Неплановая (ad-hoc) сеть (IBSS)

Специальная сеть, или независимая базовая зона обслуживания (IBSS), возникает, когда отдельные устройства-клиенты формируют самоподдерживающуюся сеть без использования отдельной точки доступа. При создании таких сетей не разрабатывают какие-либо карты места их развертывания и предварительные планы, поэтому они обычно невелики и имеют ограниченную протяженность, достаточную для передачи совместно используемых данных при возникновении такой необходимости. В отличие от варианта использования расширенной зоны обслуживания (ESS), клиенты непосредственно устанавливают соединения друг с другом, в результате чего создается только одна независимая базовая зона обслуживания (IBSS), не имеющая интерфейса для подключения к проводной локальной сети (т.е. отсутствует какая-либо распределительная система, которая необходима для объединения BSS и организации таким образом ESS). Не существует каких-либо оговоренных стандартом ограничений на количество устройств, которые могут входить в одну независимую базовую зону обслуживания. Но, поскольку каждое устройство является клиентом, зачастую определенное число членов IBSS не может связываться один с другим вследствие так называемой проблемы скрытого узла (hidden node), которая будет пояснена позже. Несмотря на это, в IBSS не существует какого-либо механизма для реализации функции ретрансляции.

Поскольку в IBSS отсутствует точка доступа, распределение времени (timing) осуществляется нецентрализованно. Клиент, начинающий передачу в IBSS, задает сигнальный (его еще называют маячковый) интервал (beacon interval) для создания набора моментов времени передачи маячкового сигнала (set of target beacon transmission time, TBTT). Когда завершается TBTT, каждый клиент IBSS выполняет следующее.

- Приостанавливает все несработавшие таймеры задержки (backoff timer) из предыдущего ТВТТ.
- Определяет новую случайную задержку.
- Если маячковый сигнал поступает до окончания случайной задержки, возобновляет работу приостановленных таймеров задержки. Если никакой маячковый сигнал не поступает до окончания случайной задержки, посылает маячковый сигнал и возобновляет работу приостановленных таймеров задержки.

Распределение времени для передачи маячковых сигналов осуществляется в специальных сетях не точкой доступа и не каким-то одним из клиентов. Поскольку такой схеме связи присуща проблема скрытого узла, вполне возможно, что в течение сигнального интервала будет передано множество маячковых сигналов от разных клиентов и другие клиенты получат множество маячковых сигналов. Однако стандарт вполне допускает такую ситуацию и никаких проблем не возникает, поскольку клиенты ожидают приема только первого маячкового сигнала, относящегося к их собственному таймеру случайной задержки.

В маячковые сигналы встроена функция синхронизации таймера (timer synchronization function, TSF). Каждый клиент сравнивает TSF в маячковом сигнале со своим собственным таймером и, если полученное значение больше, считает, что часы передающей станции идут быстрее и подстраивает свой собственный таймер в соответствии с полученным значением. Это имеет долговременный эффект синхронизации работы всей неплановой сети по клиенту с самым быстрым таймером. В больших распределенных неплановых сетях, когда многие клиенты не могут связываться напрямую, может понадобиться некоторое время для достижения синхронизации всех клиентов.

1.2.2. Базовые зоны обслуживания (BSS)

BSS - это группа работающих по стандарту 802.11 станций, связывающихся одна с другой. Технология BSS предполагает наличие особой станции, которая называется *точка доступа* (access point - AP). Точка доступа - это центральный пункт связи для всех станций BSS. Клиентские станции не связываются непосредственно одна с другой. Вместо этого они связываются с точкой доступа, а уже она направляет фреймы станции-адресату. Точка доступа может иметь порт восходящего канала (uplink port), через который BSS подключается к проводной сети (например, восходящий канал Ethernet). Поэтому BSS иногда называют инфраструктурой BSS. На рис. 1.2 представлена типичная инфраструктура BSS.



Рис. 1.2. Инфраструктура беспроводной локальной сети BSS.

1.2.3. Расширенные зоны обслуживания (ESS)

Несколько инфраструктур BSS могут быть соединены через их интерфейсы восходящего канала. Там, где действует стандарт 802.11, интерфейс восходящего канала соединяет BBS с распределительной системой (distribution system, DS). Несколько BBS, соединенных между собой через распределительную систему, образуют расширенную зону обслуживания (ESS). Восходящий канал к распределительной системе не обязательно должен использовать проводное соединение. На рис. 1.3 представлен пример практического воплощения ESS. Спецификация стандарта 802.11 оставляет возможность реализации этого канала в виде беспроводного. Но чаще восходящие каналы к распределительной системе представляют собой каналы проводной Ethernet.



Рис. 1.3. Расширенная зона обслуживания ESS беспроводной локальной сети

1.2.4. Понятие скрытого узла.

Понятие скрытого узла. Некоторая станция (№1) может не получить доступ к среде из-за другой станции, находящейся в пределах досягаемости точки доступа, но вне пределов досягаемости этой станции (№1). Эта ситуация представлена на рис. 1.4. Станции №1 и №2 находятся в зоне действия друг друга и точки доступа. При этом ни одна из них не находится в зоне действия станции №3. Однако станция №3 находится в зоне действия станции №2. Однако станция №3 находится в зоне действия станции №3. При этом ни одна из вестна как проблема скрытого узла, поскольку станция №3 невидима для станций №1 и №2.



Рис. 1.4. Проблема скрытого узла

Лекция 2. Механизм доступа к среде стандарта 802.11 (уровень МАС).

Механизм «множественного доступа с контролем несущей и предотвращением коллизий». Контроль несущей (или контроль наличия в сети сигнала от работающей станции). Фрагментация фрейма по стандарту 802.11. Форматы фреймов МАС стандарта 802.11. Форматы управляющих и служебных фреймов и фреймов данных. Функционирование под управлением распределённой координационной функции (DCF)

2.1. Механизм «множественного доступа с контролем несущей и предотвращением коллизий»

Проводные сети Ethernet, функционирующие в соответствии со стандартом 802.3, способны обнаруживать коллизии в проводной среде передачи. Две станции, передающие данные одновременно, увеличивают уровень мощности сигнала в проводнике. Это увеличение мощности сигнала показывает передающей станции, что возникла коллизия. Беспроводные станции стандарта 802.11 не обладают такой возможностью. Механизм доступа стандарта 802.11 должен предпринять все усилия для того, чтобы коллизии не возникали в принципе.

Основывающиеся на стандарте 802.11 беспроводные сети используют механизм, который называется «множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий» (carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA). CSMA/CA представляет собой механизм "прослушивание перед передачей" (listen before talk,

LBT). Передающая станция проверяет, присутствует ли в среде сигнал несущей и, прежде чем начать передачу, ожидает ее освобождения.

Остановимся более подробно на рассмотрении механизма «множественного доступа с контролем несущей и предотвращением коллизий». Для наглядности обратимся к аналогии селекторного совещания. Тогда сценарий его проведения будет следующим.

- Прежде чем участник начнет говорить, он должен сообщить, насколько длительной будет его речь. Это сообщение дает потенциальным выступающим представление о том, как долго им придется ждать возможности говорить.
- Участники не могут говорить до тех пор, пока не истечет время, зарезервированное предыдущим участником для своей речи.
- Участники не знают, услышан ли их голос, когда они говорят, до тех пор, пока они не получат подтверждение по окончании речи.
- Если два участника начали говорить одновременно, они не знают о том, что пытаются перекричать друг друга. Говорящие определяют, что они говорят одновременно, по тому факту, что не получают подтверждения того, что их речь услышана.
- Участники выжидают некоторое неопределенное (случайное) время и снова пытаются говорить, если не получают подтверждения того, что были услышаны.

Предотвращение коллизий является ключевым моментом для беспроводных сетей, поскольку они не имеют явного механизма для обнаружения коллизий. При использовании технологии CSMA/CA коллизия обнаруживается только при неполучении передающей станцией ожидаемого подтверждения.

Реализация технологии CSMA/CA стандартом 802.11 осуществляется при посредстве распределенной функции координации (distributed coordination function, DCF). Опишем следующие важные для технологии CSMA/CA 802.11 компоненты.

- Контроль несущей (или контроль наличия в сети сигнала от работающей станции).
- Фрагментация фреймов.
- Распределенная функция координации.
- Резервирование среды с помощью механизма «готовность к передаче/готовность к приему» (RTS/CTS).

2.2. Контроль несущей.

Станция, которая намеревается осуществить передачу в беспроводной среде, должна вначале проверить, используется ли несущая, то есть какой-либо сигнал. Наличие сигнала означает, что какая-либо станция осуществляет передачу информации. Если это так, станция должна отложить свою передачу до момента освобождения среды.

Станция может проверить физический уровень и убедиться в том, что несущая свободна. Но в некоторых случаях среда может быть все еще занята другой станцией через вектор распределения сети. Это таймер, значение которого обновляется данными фреймов, передаваемых через среду. Фреймы стандарта 802.11 содержат поле продолжительности (duration field). Значение продолжительности достаточно велико для того, чтобы осуществить передачу фрейма и получить подтверждение его приема.

Таким образом, станция определяет состояние среды с помощью двух методов.

- Проверка физического уровня PSY на предмет наличия несущей.
- Использование виртуальной функции контроля несущей вектора распределения сети (network allocation vector, NAV).

Любая станция обновляет значение вектора распределения сети (NAV) только тогда, когда полученное значение поля продолжительности превышает значение, хранимое в ее векторе распределения сети. Например, если значение вектора распределения сети станции составляет 10 мс, она не станет обновлять свой вектор распределения сети, если получит фрейм со значением поля продолжительности 5 мс. Однако она обновит свой вектор распределения сети, если получит фрейм со значения сети, вектор распределения сети, если получит фрейм со значения поля продолжительности 20 мс.

2.3. Фрагментация фрейма по стандарту 802.11.

Фрагментация фрейма - это выполняемая на уровне МАС функция, назначение которой - повысить надежность передачи фреймов через беспроводную среду. Под фрагментацией понимается дробление фрейма на меньшие фрагменты и передача каждого из них отдельно (рис. 2.1). Предполагается, что вероятность успешной передачи меньшего фрагмента через зашумленную беспроводную среду выше. Получение каждого фрагмента фрейма подтверждается отдельно; следовательно, если какой-нибудь фрагмент фрейма будет передан с ошибкой или вступит в коллизию, только его придется передавать повторно, а не весь фрейм. Это увеличивает пропускную способность среды.



Рис. 2.1. Фрагментация фрейма

Размер фрагмента может задавать администратор сети. Фрагментации подвергаются только одноадресатные фреймы. Широковещательные, или многоадресатные, фреймы передаются целиком. Кроме того, фрагменты фрейма передаются пакетом, с использованием только одной итерации механизма доступа к среде DSF.

Хотя за счет фрагментации можно повысить надежность передачи фреймов в беспроводных локальных сетях, она приводит к увеличению «накладных расходов» МАС-протокола стандарта 802.11. Каждый фрагмент фрейма включает информацию, содержащуюся в заголовке 802.11 МАС, а также требует передачи соответствующего фрейма подтверждения. Это увеличивает число служебных сигналов МАС-протокола и снижает реальную производительность беспроводной станции. Фрагментация – это баланс между надежностью и непроизводительной загрузкой среды.

2.3. Форматы фреймов МАС стандарта 802.11

На уровне МАС стандарта 802.11 используются фреймы трех категорий.

- Управляющие фреймы (control frames). Способствуют передаче фреймов данных при нормальном обмене информацией станциями стандарта 802.11.
- Служебные фреймы (management frames). Обеспечивают соединения беспроводных локальных сетей, аутентификацию и указывают состояние.
- Фреймы данных (data frames). Переносят данные станции от передатчика к приемнику.

Все фреймы стандарта 802.11 похожи на основной фрейм этого стандарта. Названные три типа фреймов расширяют и используют специфические участки основного фрейма МАС для своих целей. На рис. 2.2 представлены основной фрейм МАС и его поля.

Контроль фрейма	Продол- житель- ность (Ш)	Адрес 1	Адрес 2	Адрес 3	Управле- ние оче- редностью	Адрес 4	Тело фрейма	FCS
2 байт	2 байт	б байт	б байт	б байт	2 байт	24 байт	Байты 0-2312	4 байт

Рис. 2.2. Основной фрейм МАС по стандарту 802.11

1. <u>Поле контроля фрейма (frame control).</u> Размер этого поля равен 2 байтам; оно состоит из одиннадцати подполей. Это поле содержит всю управляющую информацию, необходимую для функционирования протокола МАС. В частности оно несёт информацию о типе и подтипе кадра, фрагментации, ретрансляции кадра и типе сервиса. На рис. 2.3 показаны подполя поля контроля фрейма.



Рис. 2.3. Подполя поля контроля фрейма.

Ниже перечислены одиннадцать подполей поля контроля фрейма.

- *Версия протокола (protocol version).* Указывает версию протокола 802.11 МАС. На сегодняшний день существует только одна версия, поэтому для этого поля справедливо только значение 0. Все остальные значения зарезервированы.
- *Tun (type)*. Указывает тип фрейма МАС: управляющий, служебный или фрейм данных. Четвертое значение зарезервировано.

- Подтип (subtype). Указывает подтип фрейма.
- *К распределительной системе (to DS)*. Указывает, предназначен ли фрейм для распределительной системы.
- От распределительной системы (from DS). Указывает, получен ли фрейм из распределительной системы.
- Больше фрагментов (more fragments). Указывает, является ли данный фрейм только служебным или только фреймом данных, либо следует ожидать других фрагментов.
- *Повторная передача (retry)*. Указывает, передается ли данный фрейм повторно. Позволяет приемнику отвергать дублирующие фреймы.
- Управление питанием (power management). Указывает на режим энергопотребления станции. Значение 1 говорит о том, что станция работает в режиме экономии энергопотребления, а значение 0 что она находится в активном режиме. Фреймы точки доступа всегда имеют данное значение, равное 0.
- *Больше данных (more data)*. Если бит этого поля установлен, приемная станция оповещается о том, что имеются предназначенные для нее данные, буферизированные в точке доступа.
- Защищенность, эквивалентная защищенности для проводных сетей (wired equivalent privacy, WEP). Указывает, используется ли шифрование WEP для защиты тела фрейма.
- *Параметр упорядочивания (order)*. Значение этого поля равно 1, если фрейм данных использует StrictlyOrdered service class, в противном случае оно равно 1.
- 2. <u>Продолжительность/ID (Duration/ID)</u>. Если используется поле длительности, указывается время (в микросекундах), на которое требуется выделить канал для успешной передачи кадра МАС. В некоторых кадрах управления в этом поле указывается идентификатор ассоциации, или соединения.
- 3. <u>Адреса 1, 2, 3 и 4.</u> Эти поля изменяются в зависимости от типа и подтипа фрейма. Возможны следующие типы адреса: источника, назначения, передающей станции, принимающей станции.
- 4. <u>Управление очередностью (sequence control)</u>. Содержит 4-битовое подполе номера фрагмента, используемое для фрагментации и повторной сборки, и 12-битовый порядковый номер, используемый для нумерации кадров, передаваемых между данными приёмником и передатчиком.
- 5. <u>Тело кадра.</u> Содержит модуль или фрагмент данных (информационные данные или управляющая информация MAC).
- 6. <u>FCS.</u> Это контрольная сумма фрейма. В данном поле содержится 32-разрядное значение циклического избыточного контроля (cyclic redundancy check, CRC), вычисленное для всех полей заголовка и тела фрейма MAC. Если вычисленная CRC на приёмном конце совпадает с содержимым этого поля, кадр считается успешно принятым, иначе возникает ошибка.

Для различных типов кадров некоторые поля могут отсутствовать.

2.3.1. Управляющие фреймы стандарта 802.11

В спецификации стандарта 802.11 оговорены шесть уникальных управляющих фреймов. Однако часто применяются только три из них. Поэтому в нашем курсе мы остановимся только на них. Это фреймы RTS, CTS и ACK.

<u>Фрейм RTS</u> - это запрос на резервирование среды; он является частью механизма доступа стандарта 802.11. На рис. 2.4 показан формат фрейма RTS, который состоит из следующих частей.

- Контроль фрейма (подполя поля контроля фрейма показаны на рис. 2.3).
- Продолжительность (duration). Время, необходимое для того, чтобы станции могли обменяться фреймами. Оно включает время передачи фрейма RTS, время приема фрейма CTS (включая интервал SIFS), время передачи фрейма данных (включая интервал SIFS) и время приема фрейма ACK (включая интервал SIFS). Измеряется в микросекундах (мкс).
- Адрес приемника. МАС-адрес предполагаемого получателя фрейма.
- Адрес передатчика. МАС-адрес передатчика станции-отправителя фрейма.
- Контрольная сумма фрейма (см. пояснения к рис. 2.2).

2 байт	2 байт	б байт	б байт	4 байт
фрейма	тельность	приемника	передатчика	112
Контроль	Продолжи-	Адрес	Адрес	201

Рис. 2.4. Формат фрейма RTS.

<u>Фрейм CTS</u> - это ответ на фрейм RTS. Это указание приемной станции, что среда была зарезервирована на указанное время. На рис. 2.5 показан формат фрейма CTS.

- Контроль фрейма (подполя поля контроля фрейма показаны на рис. 2.3).
- Продолжительность (duration). Величина, полученная из поля Duration предшествующего фрейма RTS, уменьшенная на время, необходимое для передачи фрейма CTS, и интервал SIFS.
- Адрес приемника. МАС-адрес предполагаемого получателя фрейма.
- Контрольная сумма фрейма (см. пояснения к рис. 2.2).

2 байт	2 байт	б байт	4 байт
фрейма	тельность	приемника	110
Контроль	Продолжи-	Адрес	FPS

Рис. 2.5. Формат фрейма СТЅ.

<u>Фрейм АСК</u> подтверждает передачу фрейма. Получатель фрейма посылает фрейм АСК отправителю, чтобы сообщить о его успешном приеме. На рис. 2.6 показан формат фрейма CTS.

• Контроль фрейма (подполя поля контроля фрейма показаны на рис. 2.3).

- Продолжительность (duration). Значение этого поля для фреймов АСК обычно равно 0, так как именно этот фрейм подтверждения содержит время передачи для интервала SIFS и фрейма АСК в своем поле Duration.
- Адрес приемника. МАС-адрес предполагаемого получателя фрейма.
- Контрольная сумма фрейма (см. пояснения к рис. 2.2).

2 байт	2 байт	б байт	4 байт
фрейма	тельность	приемника	110
Контроль	Продолжи-	Адрес	FPS

гис. 2.0. Формат фреима АСК	Рис.	2.6.	Формат	фрейма	АСК
-----------------------------	------	------	--------	--------	-----

2.3.2. Служебные фреймы стандарта 802.11

Служебные фреймы по стандарту 802.11 имеют поля, отличающиеся от описанного ранее исходного фрейма МАС, и используют структуры данных, которые называются информационные элементы (information elements, IE) и фиксированные поля (fixed fields).

На рис. 2.7 показан формат информационного элемента. Цель введения IE и фиксированных полей - предоставить гибкие возможности определения для существующих фреймов и обеспечить масштабируемый метод расширения функциональных возможностей служебных фреймов МАС. Служебные фреймы стандарта 802.11 сконструированы с использованием соответствующих полей формата основного фрейма МАС с добавлением подходящих информационных элементов и фиксированных полей (рис. 2.8).

 l байт	lбайт	
фрейма	длина	информация
Контроль	π	TT 1

Рис. 2.7. Формат информационного элемента

Контроль	Продолжи-	Адрес	Адрес	Deetto	-	TT	-	चा		चा
фрейма	тельность	назначения	источника	ടാന	т	гг	т	ш	т	ш

Рис. 2.8. Структура служебного фрейма, использующего информационные элементы и фиксированные поля.

В табл. 2.1 приведены информационные элементы, определенные в стандарте 802.11.

Информационный элемент	Элемент ID
SSID	0

Поддерживаемые скорости передачи	1
Набор параметров скачкообразного переключения час- тоты	2
Набор параметров DS	3
Набор параметров СГ	4
Набор параметров IBSS	6
Зарезервированы	7-15
Изменяющийся текст	16
Зарезервированы для расширения изменяющегося текста	17-31
Зарезервированы	32-255

Таблица 2.1. Информационные элементы, определенные в стандарте 802.11.

В дополнение к информационным элементам в спецификации стандарта 802.11 определены также десять элементов фиксированных полей для использования в служебных фреймах (табл. 2.2).

Элемент типа "фиксированное поле"	Размер (бит)
Номер алгоритма аутентификации	16
Порядковый номер транзакции аутентифика- ции	16
Сигнальный интервал	16
Информационная способность	16
Текущий адрес точки доступа	48
Интервал приема	16
Код причины	16
AID	16
Код состояния	16
Метка времени (timestamp)	64

Таблица 2.2. Фиксированные поля стандарта 802.11.

К числу служебных фреймов стандарта 802.11 относятся следующие.

- Сигнальный фрейм.
- Фрейм запроса на зондирование.
- Фрейм ответа на зондирование.
- Фрейм аутентификации.
- Фрейм деаутентификации.

- Фрейм запроса на ассоциирование.
- Фрейм ответа на ассоциирование.
- Фрейм запроса на реассоциирование.
- Фрейм ответа на реассоциирование.
- Фрейм диссоциирования.
- Фрейм индикации объявленного трафика (announcement traffic indication frame, ATIM).

2.3.3. Фрейм данных стандарта 802.11

На рис. 2.9 показан формат фрейма данных.

Контроль	Продолжи-	Адрес	Deem	Адрес	Управление	Полезная	- २०न
фрейма	тельность	назначения	പംപ	источника	ностью	нагрузка	115
2 байт	2 байт	б байт	б байт	б байт	2 байт	0 - 2312 байт	4 байт

Рис. 2.9. Формат фрейма данных (BSSID - Identification of Basic service set) – идентификация базовой зоны обслуживания.

2.4. Функционирование под управлением распределённой координационной функции (DCF)

Станция, намеревающаяся передать фрейм, должна выждать определенное время после того, как среда освободится. По истечении интервала времени станция может принять участие в состязании за право доступа к среде. При этом существует большая вероятность того, что несколько станций одновременно попытаются начать передачу тотчас после освобождения среды, что приведет к возникновению коллизии. Основным методом доступа к среде передачи данных в IEEE 802.11 MAC является распределенная координационная функция (DCF – Distributed Coordination Function), которая реализует механизм множественного доступа с контролем несущей и предотвращением коллизий (CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).

Остановимся более подробно на рассмотрении алгоритма работы DCF. Стандарт IEEE 802.11а регламентирует несколько временных интервалов, которые используются распределенной координационной функцией:

SlotTime = 9 мкс,

SIFSTime = 16 мкс,

DIFSTime = *SIFSTime* + 2**SlotTime* = 34 мкс.

Станция, работающая под управлением DCF, должна следовать двум правилам: 1) она может начинать передачу, если канал свободен в течение промежутка времени DIFS, 2) станция должна отложить передачу на случайный промежуток времени (откат), чтобы уменьшить вероятность коллизий.

Для подтверждения успешного приёма кадра (фрейма) принимающая станция передает специальный небольшой кадр, имеющий тип "подтверждение" (ACK - Acknowledgment). Передающая станция считает передачу успешной только при полу-

чении подтверждения на каждый отправленный кадр данных. Между кадром данных и его подтверждением должен использоваться наименьший из межкадровых интервалов – SIFS. Это даёт возможность завершить последовательность обмена кадрами без вмешательства третьей станции.

Если в процессе передачи фрагмента обнаруживается ошибка (передающая станция не получила подтверждения, либо проверочная последовательность СRC принятого ACK кадра не является верной), то станция должна выполнить процедуру *омката* перед попыткой повторной передачи фрагмента. Рис. 2.10 демонстрирует последовательности обмена кадрами между передающей и принимающей станцией в случае успешной передачи фрагмента и в случае ошибки. Если число попыток передачи фрагментов превысит значение *MaxTransmitMSDULifetime*, оставшиеся фрагменты не передаются, и на вышележащий уровень отправляется сообщение об ошибке.



Рис. 2.10. Последовательность обмена при успешной передаче и потере фрагмента.

Процедура отката заключается в следующем. В соответствии со стандартом IEEE 802.11 станция, осуществляющая процедуру отката, сначала должна сгенерировать случайное число – время отката и присвоить его значение таймеру отката. Однако если таймер отката (Backoff timer) уже содержит ненулевое значение, этого делать не требуется.

*Backoff Time = Random*SlotTime*,

где *Random* – псевдослучайное целое число из интервала [0, CW] (*CW* может принимать значения от *CW_{min}* до *CW_{max}*). Изначально величина *CW* принимает значение *CW_{min}*, и при неудачной попытке передачи кадра пересчитывается по формуле:

$$CW = 2(CW + 1) - 1.$$

При достижении *CW* своего максимального значения (CW_{max}) величина *CW* остаётся ему равной. В случае успешной передачи кадра *CW* сбрасывается на *CW_{min}*. В стандарте IEEE 802.11 *CW_{min}* и *CW_{max}* принимают значения 15 и 1023 соответственно.

Станция, осуществляющая процедуру отката, "слушает" канал. Если канал свободен в течение *SlotTime*, таймер отката уменьшается на *SlotTime*. Заметим, что если канал занят, станция не меняет значение таймера отката. Процедура отката будет продолжена после того, как канал будет свободен в течение промежутка времени DIFS.

Лекция 3. Принцип передачи данных в OFDM-системе и физический уровень стандарта IEEE 802.11а-1999.

Принцип передачи данных в OFDM-системе. Структурная схема OFDM-системы связи стандарта 802.11 а и назначение отдельных блоков. Основные параметры стан-

дарта 802.11а. Структура фрейма. Временная и частотная структура субфреймов "PREAMBLE", "SIGNAL" и "DATA". Математическое описание сигналов фрейма.

Основное назначение физических уровней стандарта 802.11 - обеспечить механизмы беспроводной передачи данных, а также поддерживать выполнение вторичных функций, таких как оценка состояния беспроводной среды и сообщение о нем подуровню МАС. Стандарт 802.11 разработан таким образом, что обеспечивается независимость между подуровнем МАС и физическим (PHY) уровнем PHY. Именно независимость между МАС и PHY позволила использовать дополнительные высокоскоростные физические уровни, описанные в стандартах 802.11b, 802.11a и 802.11g.

Каждый из физических уровней стандарта 802.11 имеет два подуровня.

- Physical Layer Convergence Procedure (PLCP). Процедура определения состояния физического уровня.
- Physical Medium Dependent (PMD). Подуровень физического уровня, зависящий от среды передачи.

Рассмотрим подробнее наиболее часто используемый в настоящее время стандарт 802.11а.

3.1. Принцип передачи данных в OFDM-системе

Существуют одномерные и двумерные сигналы, которые получаются при модуляции амплитуды и/или фазы. Можно сконструировать сигналы большей размерности, если дополнительно использовать другой параметр - частоту. Вся полоса частот $N\Delta f$ может быть подразделена на N частотных отрезков, каждый шириной Δf . В этом случае N-мерный сигнальный вектор можно передать через канал путем одновременной (параллельной) модуляции амплитуд N поднесущих. При этом надо позаботиться о достаточном частотном разносе между смежными несущими частотами для того, чтобы взаимная помеха не возникала между сигналами в разных частотных каналах.

Рассмотрим случай конструирования M ортогональных сигналов равной энергии, которые различаются по частоте и на интервале времени ($0 \le t \le T$) могут быть представлены как

$$s_m(t) = \operatorname{Re}\left[s_{0m}(t)\exp(j2\pi f_c t)\right] = \sqrt{\frac{2E}{T}}\cos\left[2\pi f_c t + 2\pi m\Delta f t\right], \qquad (3.1)$$

где (*m*=1,2,...,M), а эквивалентный низкочастотный сигнал определяется так:

$$s_{0m}(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \exp(j2\pi m\Delta t), \qquad (3.2)$$

Такая частотная модуляция называется модуляцией частотным сдвигом.

Сигналы характеризуются равной энергией и коэффициентами взаимной корреляции

$$\rho_{km} = \frac{2E/T}{2E} \int_{0}^{T} e^{j2\pi(m-k)\Delta f} dt = \frac{\sin \pi T(m-k)\Delta f}{\pi T(m-k)\Delta f} e^{j\pi T(m-k)\Delta f}$$
(3.3)

Вещественная часть ρ_{km} равна

$$\rho_r = \operatorname{Re}(\rho_{km}) = \frac{\sin[\pi T(m-k)\Delta f]}{\pi T(m-k)\Delta f} \cos[\pi T(m-k)\Delta f] = \frac{\sin[2\pi T(m-k)\Delta f]}{2\pi T(m-k)\Delta f} \quad (3.4)$$

Заметим, что $\operatorname{Re}(\rho_{km})=0$ когда $\Delta f=1/(2T)$ и $m \neq k$. Поскольку случай |m-k|=1 соответствует соседним частотным интервалам, то $\Delta f=1/(2T)$ - минимальная величина частотного разноса между смежными сигналами, обеспечивающая ортогональность сигналов. Кривые зависимости $\operatorname{Re}(\rho_{km})$ от Δf и $|\rho_{km}|$ от Δf показаны на рис. 3.1. Заметим, что $|\rho_{km}|=0$, если Δf кратно 1/T, в то время как $\operatorname{Re}(\rho_{km})=0$, когда Δf кратно 1/(2T).



Рис. 3.1. Реальная часть коэффициента корреляции и его модуль.

При использовании OFDM частотные каналы формируются с использованием быстрого преобразования Фурье, а разделения пользователей осуществляется за счет ортогональности канальных поднесущих (*subcarriers*). OFDM достигает ортогональности в частотной области, размещая каждый из отдельных информационных сигналов на различных поднесущие. OFDM сигнал представляют собой сумму синусоид, каждая из которых соответствует поднесущей. Частота каждой поднесущей выбрана так, чтобы быть целым числом, кратным длительности символа, в результате все поднесущие имеют целое число циклов в символе. На рис. 3.2 показано образование OFDM сигнала с четырьмя поднесущими.



Рис. 3.2. Пример OFDM сигнала с четырьмя поднесущими.

Пусть d_k – последовательность информационных символов, передаваемых на k – ой поднесущей. Запишем обратное преобразование Фурье в виде

$$c(n) = \sum_{k=1}^{N_F} d_k \cdot \exp(-j2\pi f_k n\Delta t)$$
(3.5)

где n – дискретное время, N_F – число точек обратного преобразования Фурье. Последовательность c(n) – излучается из антенны в канал. Таким образом, одновременно излучается смесь всех информационных символов.

Пусть *h* – коэффициент передачи медленно меняющегося, неселективного по частоте, канала. Тогда принятая последовательность символов данных равна

$$x(n) = hc(n) + z(n) \tag{3.6}$$

где z(n) – временная последовательность собственного шума, который будем считать гауссовским некоррелированным во времени случайным процессом с нулевым средним и единичной дисперсией.

Запишем прямое преобразование Фурье в виде

$$g_m = \sum_{n=1}^{N_F} \left[hc(n) + z(n) \right] \cdot \exp(j 2\pi f_m n \Delta t)$$
(3.7)

Подставляя (2.29) в (2.31), получим

$$g_{m} = h \sum_{n=1}^{N_{F}} \sum_{k=1}^{N_{F}} d_{k} \exp(-j2\pi f_{k} n\Delta t) \exp(j2\pi f_{m} n\Delta t) + \sum_{n=1}^{N_{F}} z(n) \exp(j2\pi f_{m} n\Delta t) \quad (3.8)$$

Учтем ортогональность поднесущих. Тогда будем иметь, что

$$g_m = N_F h d_m + \eta_m \tag{3.9}$$

где η_m – шум на *m*-ой поднесущей.

Пусть шум приемника имеет единичную дисперсию, то есть $\langle z(n)z^*(n) \rangle = 1$. Тогда дисперсия шума на *m*-ой поднесущей равна

$$<\eta_{m}\eta_{m}^{*}>=\sum_{n=1}^{N_{F}}\sum_{l=1}^{N_{F}}< z(n)z^{*}(l)>\exp(j2\pi f_{m}n\Delta t)\exp(-j2\pi f_{m}l\Delta t)=N_{F}$$
(3.10)

где z(n) – временная последовательность шума.

Если ОСШ для каждой поднесущей равно величине γ , то для ОСШ на *m*-ой поднесущей после выполнения преобразования Фурье, будем иметь

$$SNR_m = \gamma N_F |h|^2 \tag{3.11}$$

Таким образом, во-первых, обеспечивается разделение информационных символов, что видно из (2.33) и, во-вторых, ОСШ на каждой поднесущей увеличивается в N_F раз.

3.2. Структурная схема OFDM-системы связи стандарта 802.11а

Обработку сигналов в OFDM системе связи на основе стандарта 802.11а можно представить в виде структурной схемы, изображенной на рис. 3.3. Блоки данной схемы, в принципе, стандартны для многих современных цифровых систем передачи информации. Их подробное описание и функции, выполняемые ими, имеется в работе [5]. Ниже в краткой форме будет дано их назначение применительно к принципу передачи данных на основе использования ортогональных частот (OFDM).



Рис. 3.3. Структурная схема OFDM- системы. БПФ – преобразование Фурье, ОБПФ – обратное преобразование Фурье, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, QAM – квадратурная амплитудная модуляция.

3.3. Основные параметры физического уровня стандарта 802.11а

Стандарт 802.11а разработан американским институтом IEEE и специфицирует физический уровень (PHY) передачи данных в локальных вычислительных сетях нового поколения, работающих в частотном диапазоне 5 ГГц и обеспечивающих скорость передачи данных до 54 Мбит/с. Основные параметры стандарта 802.11а приведены в табл. 3.1 и будут пояснены ниже.

Параметр	Значение
Ширина полосы частот	20 МГц
Число поднесущих для данных (N _{SD})	48
Число поднесущих для пилот-сигналов (N _{SP})	4
Полное число поднесущих (N _{ST})	52
Частотный разнос поднесущих, $\Delta_{\rm F}$	0.3125 МГц (=20 MHz/64)
Период Фурье преобразований, Т _{FFT}	3.2 мкс (1/Д _F)
Размерность Фурье преобразований	64
Длительность преамбулы (Т _{PREAMBLE})	16 мкс ($T_{SHORT}+T_{LONG}$)
Длительность OFDM-символа (T _{SIGNAL})	4.0 мкс (T _{GI} +T _{FFT})
Длительность защитного интервала (T _{GI})	0.8 мкс (Т _{FFT} /4)
Длительность короткой тренирующей послед-ти (T _{SHORT})	8 мкс (10×T _{FFT} /4)
Длительность длинной тренирующей послед-ти (T _{LONG})	8 мкс $(2 \times T_{GI} + 2 \times T_{FFT})$

Табл. 3.1. Основные параметры стандарта 802.11а.

3.4. Структура фрейма.

Стандартом 802.11а предписан пакетный (фреймовой) режим передачи данных. На рис. 3.4 показан один фрейм. Видно, что он состоит из трех основных частей (субфреймов): преамбулы ("PREAMBLE"), поля "SIGNAL" и передаваемых данных ("DATA"). Частотная структура OFDM-фрейма приведена на рис. 3.5, а временная структура преамбулы и поля "SIGNAL" показана на рис. 3.6.



Рис. 3.4. Структура фрейма физического уровня стандарта 802.11а.



Рис. 3.5. Частотная структура фрейма OFDM-системы стандарта 802.11а.



Рис. 3.6. Временная структура преамбулы и заголовка фрейма.

Таким образом, каждый фрейм начинается преамбулы (субфрейм "PREAMBLE"). Длительность преамбулы составляет 16 мкс. Она состоит из 10 коротких тренирующих OFDM-символов длительностью 0.8 мкс каждый и из 2 длинных тренирующих OFDM-символов длительностью 4.0 мкс каждый (см. рис. 3.4). Короткие обучающие символы необходимы для детектирования (определения наличия) сигнала, синхронизации и грубой оценки сдвига частоты между приемником и передатчиком. Обучающая последовательность, состоящая из двух длинных одинаковых обучающих символов T₁, T₂ и удвоенного защитного интервала G12, предназначена для точного оценивания частоты и частотной характеристики пространственного канала связи. Для передачи преамбулы используется BPSK-модуляция с темпом 1/2.

По стандарту 802.11а расстройка частоты между приёмником и передатчиком (после точной подстройки частоты) не должна превышать 2×10^{-5} (0,002%) от несущей частоты, то есть в данном случае (диапазон 5 ГГц) расстройка частоты между приёмником и передатчиком должна быть меньше 100 кГц. Таким образом, при максимально возможной расстройке, фаза может сбиваться на π за время 5 мкс. За это время может быть передан только один символ.

После преамбулы передается субфрейм "SIGNAL", который представляет собой один OFDM-символ длительностью 4 мкс и показан на рис. 3.6. Структура этого субфрейма показана на рис. 3.7. Заголовок состоит из 24 бит. Первые 4 бита (R1 - R4) из поля "RATE" применяются для сообщения об используемом темпе для передачи данных (см. табл. 3.2). 5-ый бит зарезервирован на будущее. Следующие 12 бит (поле "LENGTH") применяются для сообщения о длительности данных, которые будут переданы в этом фрейме. 18-ый бит – бит четности. Наконец, последние 6 бит (поле "SIGNAL TAIL") – это нулевые биты, необходимые для приведения регистров декодера в нулевое состояние. Для передачи субфрейма "SIGNAL" используется BPSK-модуляция с темпом 1/2.



Рис. 3.7. Структура заголовка фрейма.

Темп (Мбит/с)	Значения бит (R1 – R4)		
6	1101		
9	1111		
12	0101		
18	0111 1001		
24			
36	1011		
48	0001		
54	0011		

Табл.. 3.2. Значения первых четырех бит заголовка фрейма.

После субфрейма "SIGNAL" начинается передача субфрейма данных (см. рис. 3.4). Из рис. 3.5 видно, что для передачи данных в системе используются 48 частотных подканалов (поднесущих). Остальные 4 подканала, называемые пилотными поднесущими используются прежде всего для синхронизации и подстройки фазы в процессе передачи информации. Пилотные поднесущие распределены во времени и в частотном спектре OFDM-сигнала, их амплитуды и фазы известны в точке приема, поэтому их можно использовать также для получения сведений о характеристиках канала передачи.

Субфрейм данных, в свою очередь, состоит из четырех полей (см. рис. (3.4.)): SERVICE, PSDU, TAIL, Pad Bits. Все биты этого субфрейма подвергаются операции шифрования (scrambling) путем их перестановки.

Поле SERVICE состоит из 16 бит. Первых 7 бит - это нулевые биты, которые используются для синхронизации дешифровщика (дескремблера) на приемном конце линии с шифровщиком (скремблером) на передающем конце линии. Остальные биты (также нулевые) зарезервированы на будущее.

Поле PSDU (информационное поле) содержит непосредственно передаваемые данные. Его длительность является переменной и может достигать 3 мсек.

Следующее поле TAIL состоит из 6 нулевых бит, необходимых для приведения регистров декодера в нулевое состояние.

Поле Pad Bits состоит из добавленных бит, число которых выбирается из условия, чтобы длина поля PSDU была бы кратной числу кодированных бит в OFDMсимволе (N_{CBPS}). Чтобы обеспечить выполнение такого требования длина сообщения должна быть увеличена, чтобы быть кратной числу бит передаваемых данных на OFDM символ (N_{DBPS}). Для этого используются специальные дополнительные нулевые биты (так называемые "набивочные" биты), объединенные в поле PAD. Число бит в поле PAD можно рассчитать по формулам

$$\begin{cases} N_{SYM} = ceiling(\frac{16 + 8 \cdot LENGTH + 6}{N_{DBPS}}) \\ N_{DATA} = N_{SYM} \cdot N_{DBPS} \\ N_{PAD} = N_{DATA} - (16 + 8 \cdot LENGTH + 6) \end{cases}$$
(3.12)

где функция ceiling (x) возвращает ближайшее целое значение, большее или равное x, LENGTH – длина поля PSDU.

3.5. Математическое описание сигналов фрейма.

Передаваемый OFDM-сигнал для произвольного фрейма (пакета) физического уровня можно представить в виде

$$r(t) = \operatorname{Re}\{r(t)\exp(j2\pi f_c t)\},\qquad(3.13)$$

,

где Re{.} – реальная часть, f_c – несущая частота, j – мнимая единица, r(t) - узкополосная комплексная огибающая.

Узкополосная огибающая состоит из отдельных OFDM-символов, входящих в состав фрейма, и может быть записана как:

$$r_{PACKET}(t) = r_{PREAMBLE}(t) + r_{SIGNAL}(t - t_{SIGNAL}) + r_{DATA}(t - t_{DATA})$$
(3.14)

где задержки t_{SIGNAL} =16 мкс и t_{DATA} =20 мкс показывают, что передача субфрейма "SIGNAL" субфрейма "DATA" начинается через 16 мкс и 20 мкс, соответственно, после начала передачи фрейма.

Все три субфрейма ("PREAMBLE", "SIGNAL" и "DATA") формируются с помощью обратного преобразования Фурье от набора соответствующих коэффициентов C_k (будут определены ниже) и могут быть представлены в виде

$$r_{SUBFRAME}(t) = w_{T-SUBFRAME}(t) \sum_{k=-N_{ST}/2}^{N_{ST}/2} C_k \exp(j2\pi k\Delta_f)(t - T_{GUARD}).$$
(3.15)

В этой формуле Δ_F обозначает разнос соседних поднесущих, а N_{ST} – полное число поднесущих. Результирующий сигнал имеет период равный $T_{FFT} = 1/\Delta_F$. Значения параметров Δ_F , N_{ST} и T_{FFT} приведены в таблице 3.1. Временная задержка T_{GUARD} создает защитный интервал, используемый для подавления межсимвольной интерференции, обусловленной дисперсией в пространственном канале связи. Длительность защитного интервала для длинной тренирующей последовательности равна 1.6 мкс (2× T_{GI}), а для данных - 0.8 мкс (T_{GI}). В (3.15) $w_{T-SUBFRAME}(t)$ - функция «окна», описывающая форму соответствующего сигнала длительности T. Эта длительность может быть равной одному или нескольким периодам преобразования Фурье T_{FFT} , что поясняется рис. 3.8.



Рис. 3.8. Иллюстрация OFDM-фрейма с защитным интервалом и функция «окна» для одного (а) и двух (b) периодов преобразования Фурье.

Математическое представление функции «окна» имеет вид

$$w_{T}(t) = \begin{cases} \sin^{2} \left[0.5\pi \left(0.5 + t/T_{TR} \right) \right], & (-0.5T_{TR} < t < 0.5T_{TR} \right) \\ 1, & (0.5T_{TR} < t < T - 0.5T_{TR} \right), \\ \sin^{2} \left[0.5\pi \left(0.5 - (t - T)/T_{TR} \right) \right], & (T - 0.5T_{TR} < t < T + 0.5T_{TR} \right) \end{cases}$$
(3.16)

где величина T_{TR} - показана на рис. 3.8.

Как показано на рис. 3.5 короткие тренирующие символы из поля "PREAMBLE" передаются на 12 из 52 поднесущих с номерами 3, 7, 11, 15, 19, 23, 31, 35, 39, 43, 47 и 51. То есть для их передачи используется сетка разреженных частот с разносом соседних частот равным $4\Delta_F$. Соответствующий результирующий сигнал имеет период равный $1/(4\Delta_F)$. Разреженные частоты являются ортогональными на меньшем временном интервале 0.8 мкс, а не на полном интервале 4.0 мкс.

Амплитуды сигналов на поднесущих можно записать в виде 53-мерного вектора S (включая нулевую амплитуду на нулевой частоте) с компонентами в виде

где (13/6)^{0.5} - нормирующий множитель.

Тогда соответствующий сигнал можно записать как

$$r_{SHORT} = w_{T-SHORT}(t) \sum_{k=-26}^{26} S_k \exp(j2\pi k \Delta_F t), \qquad (3.17)$$

где $w_{T-SHORT}(t) - функция огибающей соответствующего импульса.$

Для передачи длинных тренирующих OFDM-символов используются все 52 поднесущие частоты (см. рис. 3.1). Амплитуды на поднесущих можно записать в виде

53-мерного вектора L (включая нулевую амплитуду на нулевой частоте) с компонентами в виде

Тогда соответствующий длинный обучающий OFDM-сигнал имеет вид

$$r_{LONG} = w_{T-LONG}(t) \sum_{k=-26}^{26} L_k \exp(j2\pi k \Delta_F(t - T_{G12}))$$
(3.18)

где $w_{T-LONG}(t)$ – функция огибающей импульса, $T_{G12}=1.6$ мкс, а $T_{LONG}=(1.6+2\times3.2)=8$ мкс.

В результате с помощью (6.1) и (6.2) имеем, что огибающая сигнала преамбулы равна

$$r_{PREAMBLE}(t) = r_{SHORT}(t) + r_{LONG}(t - T_{SHORT})$$
(3.19)

где задержка *t_{SHORT}* =8 мкс показывают, что передача длинных тренирующих OFDMсимволов начинается через 8 мкс, после начала передачи фрейма.

Способ применения обратного Фурье-преобразования в соответствии с формулой (3.15) следующий. Используется 64-точечное быстрое Фурье-преобразование, а число используемых в стандарте поднесущих равно 52. Поэтому 52 коэффициента C_k дополняются до 64 с помощью 12 нулевых коэффициентов.

Лекция 4. Формирование фрейма физического уровня стандарта IEEE 802.11а.

Процедура формирования фрейма. Шифрование/дешифрование данных. Сверточное кодирование и перфорирование (punchuring). Перемежение данных (interleaving u deinterleaving). Модуляция данных. Формирование OFDM-символа. Используемые диапазоны частот (channelization). Уровни мощности передатчика. Спектр излучаемого сигнала (спектральная маска). Допустимые ошибки в амплитуде при модуляции. Требуемая вероятность фреймовых (пакетных) ошибок и необходимая чувствительность приемника.

4.1. Процедура формирования фрейма.

Согласно стандарту IEEE 802.11а процесс формирования фрейма представляет собой последовательность шагов, краткое описание которых приведено ниже:

а) создание преамбулы, состоящей из 10 повторений короткой тренировочной последовательности и 2 повторений длинной тренировочной последовательности, предваряемых защитным интервалом (GI);

б) создание заголовка фрейма из полей RATE, LENGTH и SERVICE и заполнение соответствующих полей. Кодирование поля SIGNAL в OFDM символ также подразумевает выполнение следующих шагов: сверточное кодирование, процедура перемешивания (interleaving), BPSK модуляция, добавление пилотных сигналов, выполнение обратного преобразования Фурье, добавление защитного интервала для передачи данных с темпом 6 Мбит/с. Содержимое поле SIGNAL не скремблируется;

в) на основе данных поля RATE осуществляется вычисление числа бит данных на OFDM символ, числа кодированных бит на поднесущую, числа кодированных бит на OFDM символ;

г) построение поля DATA;

е) инициализация шифратора (scrambler) псевдослучайной последовательностью, генерация последовательности шифра и выполнение шифровки битов поля DATA;

ж) замена 6 зашифрованных битов поля TAIL шестью нулевыми битами.

з) кодирование поля DATA сверточным кодером с темпом 1/2. Выполнение процедуры выкалывания (пунктуации) для достижения желаемого темпа кодирования (по данным поля RATE заголовка фрейма);

и) закодированная последовательность битов разбивается на группы по N_{CBPS} бит. Внутри каждой группы выполняется процедура перестановки (interleaving) в соответствии с выбранным темпом кодирования;

к) полученная битовая последовательность разбивается на группы по N_{BPSC} бит. Каждая группа превращается в последовательность комплексных чисел в соответствии с таблицами модуляции;

л) последовательность комплексных чисел разбивается на группы по 48 чисел (по числу поднесущих, используемых для передачи данных). Каждая группа ассоциируется с одним OFDM символом. В каждой группе комплексные числа нумеруются от 0 до 47 и передаются на поднесущие со следующими номерами: с -26 до -22, с -20 до -8, с -6 до -1, с 1 до 6, с 8 до 20, с 22 до 26. Поднесущие с номерами -27, -7, 7, 21 пропускаются для добавления пилотных сигналов. Поднесущая с номером '0' ассоциируется с центральной частотой и заполняется нулевым значением;

м) осуществляется добавление пилотных сигналов на поднесущие с номерами - 21, -7, 7 и 21. Общее число используемых поднесущих таким образом составит 52;

 н) для каждого OFDM символа (группа из 52 поднесущих с номерами от -26 до +26, включая центральную частоту) осуществляется преобразование во временную область и формирование защитного интервала;

о) формирование последовательности из OFDM символов, полученных на основе поля DATA;

п) перевод последовательности в радиочастотный диапазон в соответствии с центральной частотой и передача данных приемнику.

Далее более подробно рассматриваются процедуры, связанные с преобразованием данных по вышеописанному алгоритму.

4.2. Шифрование/дешифрование данных.

Как отмечалось биты поля DATA должны быть зашифрованы стандартным фрейм-синхронизированным скремблером. Использование скремблера на передающей стороне и дескремблера на приемной позволяет уменьшить вероятность обнаружения передачи данных.

Скремблер стандарта 802.11а имеет длину равную 127 и использует следующий образующий полином

$$S(x) = x^7 + x^4 + 1 \tag{4.1}$$

Функциональная схема скремблера данных представлена на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Схема скремблера стандарта 802.11а.

Повторяющаяся 127 битная последовательность, генерируемая скремблером имеет вид (самый левый бит используется первым) при условии, что исходным является состояние 11111111 ("все единицы"):

Данный скремблер используется как на передающей стороне для шифрования передаваемых данных, так и на стороне приемника для дешифрования принимаемых данных. Перед началом операции, скремблер на передающей стороне должен быть инициализирован псевдослучайной ненулевой последовательностью. Семь первых битов поля SERVICE должны иметь нулевые значения перед шифрованием для того, чтобы дескремблер на приемной стороне смог оценить исходное состояние скремблера передатчика и осуществить адекватное дешифрование данных. Процедура дешифрования аналогична шифрованию.

4.3. Сверточное кодирование и перфорирование (punchuring).

Далее используется сверточное кодирование с кодовым ограничением K=7. Сверточный кодер (см. рис. 5.8) обеспечивает темп кодирования R=1/2. Генераторные полиномы кодера в восьмеричной системе: выход A - $g_A=133_8$ и выход B - $g_B=171_8$. В двоичной системе генераторные полиномы кодера имеют вид: $g_A=001011011_2$ и выход B - $g_B=001111001_2$. Выходной поток кодированных бит представляется совокупностью потоков с выходов A и B, показанных на рис. 4.2, причем каждый бит с выхода B должен позиционироваться после соответствующего бита выхода A, т.е. $\{A_iB_i\}$.



Рис. 4.2. Сверточный кодер.

Описанный кодер осуществляет кодирование информации с темпом 1/2, т.е. каждый входной бит кодируется двумя битами. Однако стандарт IEEE 802.11a обеспечивает поддержку и более высоких темпов кодирования: 2/3 и 3/4. Для достижения подобных темпов кодирование осуществляется в два этапа:

Темпы кодирования R=3/4 и R=2/3 обеспечиваются не за счет другого кодера, а за счет процедуры «выкалывания» или перфорирования (punchuring) бит. На рис. 4.3 показано формирование темпа кодирования равного R=3/4, а на рис. 4.4 - формирование темпа кодирования равного R=3/4, а на рис. 4.4 - формирование темпа кодирования равного R=2/3.



Рис. 4.3. Формирование темпа кодирования *R*=3/4.



Рис. 4.4. Формирование темпа кодирования *R*=2/3.

4.4. Перемежение данных (interleaving и deinterleaving)

Согласно стандарту IEEE 802.11а, все кодированные биты данных должны быть подвергнуты перестановке блочным интерливером (англ. interleave – перестанавливать, перемешивать), размер блока которого соответствует количеству кодированных бит на OFDM символ. Данная информация берется из поля RATE заголовка фрейма. Интерливер осуществляет двухфазовую перестановку битов в последовательности. Первая фаза перестановок осуществляется с целью обеспечения такой ситуации, при которой смежные биты исходной последовательности находились бы на разных (несмежных) поднесущих. Вторая фаза перестановок используется для того, чтобы обеспечить ситуацию, при которой смежные биты исходной последовательности были перенесены попеременно на менее и более старшие разряды сигнального созвездия отображения символов. Этот процесс является важным, потому что в созвездиях высшего порядка самые младшие биты (LSB) часто передаются с меньшей надежностью. В самом деле, точки сигнальных созвездий (см. ниже), которые близки и более подвержены искажениям и ошибкам, имеют тенденцию отличаться только своими самыми младшими битами.

Обозначим через k индекс бита исходной кодированной последовательности до первой фазы перестановок, а через i – индекс того же бита после первой фазы перестановок, аналогично, через j обозначен индекс k-го бита после второй фазы перестановок. Тогда преобразование индексов в первой фазе перестановок можно записать в следующем виде:

$$i = \frac{N_{CBPS}}{16} \cdot \text{mod}(k, 16) + floor(\frac{k}{16}), \qquad k = \overline{0, N_{CBPS} - 1}$$
(4.2)

где mod(x,y) – функция, возвращающая остаток от деления числа x на число y; floor(y) – функция возвращающая ближайшее целое число, меньше или равное аргументу функции.

Вторая фаза перестановок определяется следующим правилом:

$$\begin{cases} j = s \cdot floor\left(\frac{i}{s}\right) + \operatorname{mod}((i + N_{CBPS} - floor\left(\frac{16 \cdot i}{N_{CBPS}}\right)), s), & i = \overline{0, N_{CBPS} - 1} \\ s = \max\left(\frac{N_{BPSC}}{2}, 2\right) \end{cases}$$
(4.3)

/

где *max(x,y)* – функция, возвращающая значение максимального аргумента из числа входных.

Деинтерливер располагается на приемной стороне и выполняет обратную операцию, также осуществляя двухфазовую перестановку битов. По аналогии с процессом перестановке данных на передающей стороне, обозначим через j исходный индекс бита в полученной кодированной последовательности. Через i обозначим индекс того же бита уже после первой фазы перестановок и, наконец, через k обозначим индекс бита после второй фазы перестановок непосредственно перед подачей последовательности на декодер Витерби.

Тогда первая фаза перестановок по аналогии с (4.2) может быть записана в следующем виде:

$$i = s \cdot floor\left(\frac{j}{s}\right) + mod((j + floor\left(\frac{16 \cdot j}{N_{CBPS}}\right)), s), \qquad j = \overline{0, N_{CBPS} - 1}$$
(4.4)

где *s* вычисляется аналогично (4.3).

Индекс бита после второй фазы перестановок будет определяться выражением:

$$k = 16 \cdot i - (N_{CBPS} - 1) \cdot floor(\frac{16 \cdot i}{N_{CBPS}}), \qquad i = \overline{0, N_{CBPS} - 1}$$

$$(4.5)$$

4.5. Модуляция.

В таблице 4.1 приведены параметры, касающиеся темпа передачи данных и используемых типов модуляции. Темпы 6, 12 и 24 Мбит/сек поставляется в обязательном порядке, а остальные - рекомендуются.

Темп пе- редачи, Мбит/сек	Модуля- ция	Темп коди- рования	Число кодиро- ванных бит на поднесущую	Число кодиро- ванных бит на OFDM символ	Число бит дан- ных на OFDM символ
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Табл. 4.1. Темп передачи данных и используемые типы модуляции.

Согласно стандарту IEEE 802.11а OFDM поднесущие должны быть модулированы с использованием BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM модуляции в зависимости от темпа, с которым осуществляется передача данных. Битовая последовательность, образованная на выходе интерливера разбивается на группы по N_{BPSC} бит (число кодированных бит на поднесущую - см. табл. 4.1). Затем каждая группа преобразуется в комплексное число, согласно так называемым сигнальным созвездиям (рис. 4.5) и таблицам модуляции (табл. 4.2 – 4.5).

Результат преобразования группы кодированных битов в комплексное число можно записать в виде:

$$d = K_{MOD}(I + jQ), \qquad (4.6)$$

где *I* и *Q* – реальная и мнимая квадратуры комплексного символа, K_{MOD} – нормирующий множитель, обеспечивающий одинаковую среднюю мощность для всех типов модуляции. Значение K_{MOD} зависит от выбранного типа модуляции и равно $K_{MOD} = 1$, $1/\sqrt{2}$, $1/\sqrt{10}$ и $1/\sqrt{42}$ для BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM модуляций соответственно.



Bход b ₀	І-выход	Q-выход
0	-1	0
1	1	0

таол. 4.2. таолица DF SK модуляции	Табл. 4.2.	Таблица	BPSK	модуляции
------------------------------------	------------	---------	-------------	-----------

Bход b ₀	код b ₀ І-выход Вход b ₁		Q-выход
0	-1	0	-1
1	1	1	1

Табл. 4.3.	Таблица	QPSK	модуляции
------------	---------	-------------	-----------

Вход b ₀ b ₁	Зход b ₀ b ₁ І-выход		Q-выход
00	-3	00	-3
01	-1	01	-1
11	1	11	1
10	3	10	3

Табл. 4.4. Таблица 16-QAM модуляции

Вход b ₀ b ₁ b ₂	I-выход	Вход b ₃ b ₄ b ₅	Q-выход
000	-7	000	-7
001	-5	001	-5
011	-3	011	-3
010	-1	010	-1
110	1	110	1
111	3	111	3
101	5	101	5
100	7	100	7

Табл. 4.5. Таблица 64-QAM модуляции

4.4. Формирование OFDM-символа.

При большом числе поднесущих возникает естественный вопрос о практической реализации системы OFDM. Решение находится благодаря тому, что модуляция OFDM представляет собой обратное преобразование Фурье, а демодуляция – прямое. Существование хорошо отработанных быстрых алгоритмов преобразования Фурье и промышленный выпуск интегральных схем процессоров снимает проблему практической реализации. В большинстве быстрых алгоритмов Фурье размер массива, подвергающегося преобразованию, кратен целой степени числа 2. Поэтому можно использовать, например, размер массива N=64. На практике число поднесущих меньше, часть поднесущих не используется, поскольку между полосами соседних каналов должен быть оставлен некоторый зазор. В стандарте 802.11а используются 52 поднесущие.

Согласно стандарту IEEE 802.11а в каждом OFDM символе 4 поднесущих используются для передачи пилотных сигналов для обеспечения устойчивости когерентного приема по отношению к частотным сдвигам и фазовым помехам. Пилотные сигналы передаются на поднесущих с номерами минус 21, минус 7, 7 и 21. Данные, передаваемые на пилотных поднесущих должны содержать псевдослучайную двоичную последовательность и быть модулированными с использованием BPSK модуляции.

Для создания OFDM-символа поток комплексных чисел разбивается на группы по N_{SD} =48 чисел (по количеству поднесущих для передачи данных). Введем обозначение комплексного числа для перевода на *k*-ю поднесущую *n*-го OFDM символа:

$$d_{k,n} = d_{k+N_{SD},n}, \qquad k = 0, \dots, N_{SD} - 1, \quad n = 0, \dots, N_{SYM} - 1,$$
 (4.7)

где *N_{SYM}* – количество OFDM символов.

OFDM символ $r_{DATA,n}(t)$ определен как:

$$r_{DATA,n}(t) = w_{TSYM}(t) \cdot \left(\sum_{k=0}^{N_{SD}-1} d_{k,n} \cdot \exp(j2\pi M(k)\Delta_F(t-T_{GI})) + p_{n+1} \cdot \sum_{k=-N_{ST}/2}^{N_{ST}/2} p_k \cdot \exp(j2\pi k\Delta_F(t-T_{GI})) \right)$$
(4.8)

где $N_{ST} = 52$, общее количество используемых поднесущих; M(k) определяет преобразование номера поднесущей (0÷47) в номер частотного смещения (-26÷26), пропуская номера пилотных поднесущих и центральную частоту (поднесущая с номером 0).

$$M(k) = \begin{cases} k - 26, & 0 \le k \le 4 \\ k - 25, & 5 \le k \le 17 \\ k - 24, & 18 \le k \le 23 \\ k - 23, & 24 \le k \le 29 \\ k - 22, & 30 \le k \le 42 \\ k - 21, & 43 \le k \le 47 \end{cases}$$
(4.9)

Добавление пилотных поднесущих в *n*-й OFDM символ осуществляется путем выполнения преобразования Фурье последовательности:

Построение последовательности из $N_{\mbox{\scriptsize SYM}}$ OFDM символов может быть представлено в виде:

$$r_{DATA}(t) = \sum_{n=0}^{N_{SYM}-1} r_{DATA,n}(t - nT_{SYM})$$
(4.11)

На рис. 4.6 показано частотное распределение пилотных поднесущих и поднесущих данных. Для избежания трудностей при цифро-аналоговом и аналого-цифровом преобразовании, заполнение центральной (нулевой - DC) поднесущей не используется.



Рис. 4.6. Распределение пилотных поднесущих и поднесущих данных по частотам

4.5. Используемые диапазоны частот (channelization).

В стандарте 802.11а предложено использовать физический канал, в котором используется технология мультиплексирования с разделением по ортогональным частотам (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) в диапазоне 5 ГГц. Стандарт узаконил скорости передачи до 24 Мбит/с (в обязательном порядке) и опционально - до 54 Мбит/с в безлицензионных диапазонах национальной информационной инфраструктуры США U-NII (unlicensed national information infrastructure) 5,15÷5,25 ГГц, 5,25÷5,35 ГГц и 5,725÷5,825 ГГц. Стандарт 802.11а регламентирует использование каналов шириной 20 МГц и определяет по четыре канала для каждого из трех диапазонов.

Центральные частоты определяются следующим выражением (МГц):

$$f_{0i} = 5000 + 5 \times i$$
 (*i* = 0,2,...,200),

где *i*=36,40,44 и 48 для первого поддиапазона; *i*=52,56,60 и 64 для второго поддиапазона; *i*=149,153,157 и 161 для третьего поддиапазона. Соответствующие центральные частоты равны 5180, 5200, 5220, 5240 МГц (первый поддиапазон); 5260, 5280, 5300, 5320 МГц (второй поддиапазон); 5745, 5765, 5785, 5805 МГц (третий поддиапазон). Распределение частотных каналов показано на рис. 5.1.



Рис. 5.1. Распределение частотных каналов.

4.6. Уровни мощности и спектр излучаемого сигнала (спектральная маска).

Максимальный уровень излучаемой мощности при условии, что усиление антенны не превышает 4 (6 дБ), составляет 40 мВт (2,5 мВт/МГц), 200 мВт (12,5 мВт/МГц) и 800 мВт (50 мВт/МГц) в первом, втором и третьем поддиапазонах, соответственно.

Спектральная плотность мощности передаваемого сигнала должна быть в пределах спектральной маски, показанной на рис. 5.2. Видно, что спектр может быть прямоугольным в диапазоне шириной до 18 МГц, ширина спектра не должна превышать 22 МГц, 40 МГц и 60 МГц по уровню -20 дБ, -28 дБ и -40 дБ, соответственно. На этом же рисунке приведен пример спектра типичного сигнала.



Рис. 5.2. Спектральная маска для передаваемого сигнала и пример спектра сигнала.

4.7. Допустимые ошибки в амплитуде при модуляции.

Относительные среднеквадратические ошибки, усредненные по всем частотам, не должны превышать следующих величин: -5, -8, -10, -13, -16, -19, -22 и -25 дБ для скоростей передачи данных 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 и 54 Мбит/сек, соответственно.

4.8. Требуемая вероятность фреймовых (пакетных) ошибок и необходимая чувствительность приемника.

Вероятность фреймовых (пакетных) ошибок (packet error rate – PER) не должна превышать 10% при длине пакета 1000 бит и при уровне сигнала на входе антенны -82, -81, -79, -77, -74, -70, -66 и -65 дБ относительно мВт, для скоростей передачи данных 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 и 54 Мбит/сек, соответственно. Приемник должен обеспечить максимальную вероятность пакетных ошибок не более 10% при длине пакета 1000 бит и при максимальной величине сигнала на входе антенны -30 дБ относительно мВт для всех скоростей передачи данных.

Лекция 5. Беспроводные локальные сети стандарта 802.11. Стандарт 802.11b.

Два подуровня физических уровней стандарта 802.11. Локальные сети со скачкообразной перестройкой частоты (процедура определения состояния физического уровня, модуляция). Локальные сети с расширением спектра методом прямой последовательности (процедура определения состояния физического уровня, модуляция). Беспроводные локальные сети стандарта 802.11b. Высокоскоростная (High Rate) технология расширения спектра методом прямой последовательности (HR-DSSS). Модуляция комплементарных кодов и при двоичном пакетном сверточном кодировании (PBCC). Уровни мощности и спектр излучаемого сигнала (спектральная маска) стандарта 802.11b.

Концепции беспроводных физических уровней.

Основное назначение физических уровней стандарта 802.11 - обеспечить механизмы беспроводной передачи для подуровня управления доступом к среде передачи (MAC - Medium Access Control), а также поддерживать выполнение вторичных функций, таких как оценка состояния беспроводной среды и сообщение о ней подуровню MAC. Разрабатывая эти механизмы передачи независимо от подуровня, стандарт 802.11 усовершенствовал как подуровень МАС, так и физический подуровень (PHY), а также интерфейс, поддерживаемый МАС. Именно независимость между подуровнем MAC и физическим подуровнем и позволила использовать дополнительные высокоскоростные физические уровни, описанные в стандартах 802.11b и 802.11a.

Каждый из физических уровней стандарта 802.11 имеет два следующих подуровня:

- Physical Layer Convergence Procedure (PLCP) процедура определения состояния физического уровня;
- Physical Medium Dependent (PMD) подуровень физического уровня, зависящий от среды передачи.

На рис. 5.1 показано, как эти подуровни соотносятся между собой и с вышестоящими уровнями, где подуровень LLC (logical link control) представляет собой подуровень управления логическим соединением.

		Уровень приложений
		Уровень представлений
		Сеансовый уровень
Полуровень LLC	<u> </u>	Транспортный уровень
		Сетевой уровень
подуровень МАС	L	Канальный уровень
	-	Физический уровень
Подуровень PLCP		
Подуровень PDM		

Рис. 5.1. Подуровни физического уровня модели взаимодействия открытых систем (Open System Interconnection, OSI)

Подуровень PLCP по существу является уровнем обеспечения взаимодействия, на котором осуществляется перемещение элементов данных протокола MAC (MAC protocol data units, MPDU) между MAC-станциями с использованием PMD подуровня, зависящего от среды передачи, на котором реализуется тот или иной метод передачи и приема данных через беспроводную среду. Можно считать, что подуровень PMD выполняет функцию службы беспроводной передачи; а взаимодействие этих служб осуществляется посредством процедуры определения состояния физического уровня (PLCP). Подуровни PLCP и PMD отличаются для разных вариантов стандарта 802.11.

Исходный стандарт 802.11 определяет два метода передачи данных на физическом уровне:

- технология расширения спектра путем скачкообразной перестройки частоты (FHSS) в диапазоне 2,4 ГГц.
- технология широкополосной модуляции с расширением спектра методом прямой последовательности (DSSS) в диапазоне 2,4 ГГц.

Обе эти технологии работают в диапазоне 2,4 ГГц, в котором выделена спектральная полоса шириной 82 МГц.

1. Беспроводные локальные сети со скачкообразной перестройкой частоты.

Беспроводные локальные сети со скачкообразной перестройкой частоты (FHSS) поддерживают скорости передачи 1 и 2 Мбит/с. Как следует из названия, устройства FHSS осуществляют скачкообразную перестройку частоты по заранее заданной схеме. Устройства FHSS делят предназначенную для их работы полосу частот от 2,402 до 2,480 ГГц на 79 неперекрывающихся каналов (это справедливо для Северной Америки и большей части Европы). Ширина каждого из 79 каналов составляет 1 МГц, поэтому беспроводные локальные сети FHSS используют относительно высокую скорость передачи символов, 1 МГц, и намного меньшую скорость перестройки с канала на канал.

Последовательность перестройки частоты имеет следующие параметры: частота перескоков не менее 2,5 раз в секунду как минимум между 6-ю (6 МГц) каналами. Чтобы минимизировать число коллизий между перекрывающимися зонами покрытия, возможные последовательности перескоков разбиваются на три набора последовательностей, длина которых для Северной Америки и большей части Европы составляет 26. Первый набор состоит из 0, 3, 6, 9, ..., 75 частот, второй набор – из 1, 4, 7, 10, ..., 76 частот, и третий набор – из 2, 5, 8, 11, ..., 77 частот.

Схема обеспечивает медленный переход с одного возможного канала на другой таким образом, что после каждого скачка перекрывается полоса частот, равная как минимум 6 МГц. Благодаря этому в многосотовых сетях минимизируется возможность возникновения коллизий.

Процедура определения состояния физического уровня.

После того как уровень МАС пропускает МАС-фрейм, который в локальных беспроводных сетях FHSS называется также *служебный элемент данных PLCP*, или *PSDU* (сокращение от PLCP service data unit), подуровень PLCP добавляет два поля в начало фрейма, чтобы сформировать таким образом фрейм PPDU (PPDU - это элемент данных протокола PLCP). На рис. 5.2 представлен формат фрейма FHSS подуровня PLCP.

			DOBOK I		МАС-фрейм
Syns	Syns SFD PLW PSF			CRC	(PSDU)
80 бнт	16 бнт	12 бнт	4 бнт	16 бнт	

Рис. 5.2. Формат фрейма FSSS подуровня PLCP стандарта 802.11.

Преамбула фрейма PLCP состоит из двух подполей.

- Подполе Sync размером 80 бит. Строка, состоящая из чередующихся 0 и 1, начинается с 0. Приемная станция использует это поле, чтобы принять решение о выборе антенны при наличии такой возможности, откорректировать уход частоты (frequency offset) и синхронизировать распределение пакетов (packet timing).
- Подполе флага начала фрейма (start of frame delimiter, SFD) размером 16 бит. Состоит из строки (0000 1100 1011 1101, крайний слева бит первый). Обеспечивает синхронизацию фреймов (frame timing) для приемной станции.

Заголовок фрейма PLCP состоит из трех подполей.

- Слово длины служебного элемента данных PLCP (PSDU), PSDU length word (PLW) размером 12 бит. Указывает размер фрейма MAC (PSDU) в октетах.
- Сигнальное поле PLCP (signaling field PLCP, PSF) размером 4 бит. Указывает скорость передачи данных конкретного фрейма.
- Подполе CRC (циклический избыточный код) шириной 16 бит, обеспечивающее оценку правильности переданного фрейма.

Служебный элемент данных PLCP (PSDU) проходит через операцию скремблирования с целью рандомизации последовательности входных битов.

Модуляция.

При использовании технологии FHSS применяется модуляция, основанная на гауссовом переключении частот (Gaussian frequency shift keying, GFSK). Для ее пояснения рассмотрим вначале частотную манипуляцию (frequency shift keying, FSK), которая осуществляется путем представления каждого символа соответствующей частотой. Например, двоичное значение 0 передается синусоидальным сигналом с частотой f_1 , а двоичное значение 1 - сигналом с частотой f_2 . Эти частоты обычно указывают относительно несущей частоты f_c . Тогда имеем, что $f_1=f_c-f_d$ и $f_2=f_c+f_d$, где f_d - девиация частоты.

Одна из серьезных проблем при использовании FSK, заключается в следующем. Если рассмотреть процесс передачи 0, следующего сразу же после 1, то при этом требуется, чтобы частота сигнала мгновенно изменилась со значения f_c - f_d на значение f_c + f_d . Это приводит к прерывному изменению выходного сигнала, во время которого выделяется много энергии на частотах, выходящих за частотный диапазон. Чтобы решить эту проблему, сигнал, поступающий на частотный модулятор, фильтруется для сглаживания переходов с частоты f_c - f_d на частоту f_c + f_d . В случае использования модуляции GFSK используется гауссов фильтр. В соответствии со стандартом 802.11 девиация частоты f_d составляет не менее 110 кГц.

При работе на скорости 2 Мбит/с используется четверичная модуляция 4GFSK; в этом случае два бита модулируют сигнал одновременно с использованием двух девиаций частоты. При этом используется следующее преобразование пар бит в частоту: биты 10 передаются синусоидальным сигналом с частотой f_c+f_{d2} ; биты 11 - сигналом с частотой f_c+f_{d1} ; биты 01 - сигналом с частотой f_c-f_{d1} ; биты 00 - сигналом с частотой f_c-f_{d2} . Первая девиация частоты f_{d1} , примерно в 3 раза больше, чем вторая (f_{d2}).

2. Беспроводные локальные сети с расширением спектра методом прямой последовательности.

В спецификации стандарта 802.11 оговорено использование и другого физического уровня - на основе технологии широкополосной модуляции с расширением спектра методом прямой последовательности (DSSS). В соответствии со стандартом 802.11 от 1997 года, технология DSSS поддерживает скорости передачи 1 и 2 Мбит/с.

Беспроводные локальные сети DSSS используют каналы шириной 22 МГц, благодаря чему многие WLAN могут работать в одной и той же зоне покрытия. В Северной Америке и большей части Европы каналы шириной 22 МГц позволяют создать в диапазоне 2,4-2,483 ГГц три неперекрывающихся канала передачи.

Процедура определения состояния физического уровня.

Аналогично подуровню PLCP, используемому в технологии FHSS, подуровень PLCP технологии DSSS стандарта 802.11 добавляет два поля во фрейм MAC, чтобы сформировать PPDU: преамбулу PLCP и заголовок PLCP. Формат фрейма представлен на рис. 5.3.

128 бит	16 бит	8 бнт	8 бнт	16 бнт	16 бнт	•
Syns	SFD	Signal	Service	Length	CRC	МАС-фрейи
Преамбула	a PLCP	Заголовок PLCP				

Рис. 5.3. Формат фрейма DSSS PPDU подуровня PLCP стандарта 802.11.

Преамбула PLCP состоит из двух подполей.

- Подполе Sync шириной 128 бит, представляющее собой строку, состоящую из единиц. Задача этого подполя обеспечить синхронизацию для приемной станции.
- Подполе SFD шириной 16 бит. Его задача обеспечить синхронизацию (timing) для приемной станции.

Заголовок PLCP состоит из четырех подполей.

- Подполе Signal шириной 8 бит, указывающее тип модуляции и скорость передачи для данного фрейма.
- Подполе Service шириной 8 бит, зарезервировано для будущих модификаций стандарта.
- Подполе Length шириной 16 бит, указывающее количество микросекунд (из диапазона 16÷2¹⁶-1), необходимое для передачи части МАС фрейма.
- Подполе CRC (циклический избыточный код) шириной 16 бит, обеспечивающее оценку правильности переданного фрейма.

Подуровень PLCP преобразует фрейм в поток битов и передает данные на подуровень физического уровня, зависящий от среды передачи (PMD - Physical Medium Dependent). Весь PPDU проходит через процесс скремблирования с целью рандомизации данных.

Скремблированная преамбула PLCP всегда передается со скоростью 1 Мбит/с, в то время как скремблированный фрейм MPDU передается со скоростью, указанной в подполе Signal. Подуровень PMD модулирует рандомизированный поток битов, используя следующие методы модуляции.

- Двоичная относительная фазовая манипуляция (differential binary phase shift keying, DBPSK) для скорости передачи 1 Мбит/с.
- Квадратурная фазовая манипуляция (quadrature phase shift key, QPSK) для скорости передачи 2 Мбит/с.

Модуляция.

Рассмотрим процесс модуляции при использовании технологии расширения спектра методом прямой последовательности (DSSS) на подуровне физического уровня, зависящий от среды передачи (PMD - Physical Medium Dependent).

Импульсные сигналы принято характеризовать произведением длительности импульса T на ширину его спектра W. Этот параметр называют базой сигнала B=WT. Для простых импульсов база сигнала равна примерно единице. В стандарте 802.11 с технологией DSSS используются сигналы с базой, которая много больше единицы. Такие сигналы называются широкополосными. Расширение полосы сигнала достигается за счет дополнительной модуляции, которая используется как способ кодирования сигнала. Отметим, что полоса частот, занимаемая таким сигналом, все же остается малой по сравнению с несущей частотой f_c , т.е. $W << f_c$.

Можно сказать, что каждый бит заменяется или расширяется кодом, расширяющим полосу частот. Во многом благодаря такому кодированию, когда информационный бит заменяется намного большим числом бит, эта технология позволяет передавать информацию при малом соотношении сигнал/шум. При использовании DSSS переданный сигнал, по сути, усиливается за счет применения расширяющей последовательности, совместно используемой передатчиком и приемником.

Беспроводные локальные сети типа DSSS особым образом кодируют данные, получая поток данных со скоростью 1 Мбит/с с канального уровня и преобразуя его в 11-мегагерцевый поток элементарных сигналов, или чипов (chip). Расширяющая спектр последовательность (ее еще называют расщепляющей (chipping) последовательностью или последовательностью Баркера) преобразует биты данных в элементарные сигналы, и имеет длину 11 бит. В случае работы на скорости 1 и 2 Мбит/с один бит данных «расширяется» до 11 бит (двоичная 1 расширяется до значения 1111111111, а двоичный 0 - до значения 0000000000). «Расширенные» биты данных затем подаются на схему "ИЛИ" либо "исключающее ИЛИ" (exclusive OR - HOR) одновременно с расширяющей последовательностью. Получившиеся в результате чипы преобразуются в символы и модулируются. Этот процесс представлен схематически на рис. 5.4.



Рис. 5.4. Расширение битов данных для 1 и 0.

Чтобы приемнику не приходилось удалять фазовую составляющую, возникающую при уходе частоты, в стандарте 802.11 используется относительная (иногда ее называют дифференциальной) двоичная фазовая модуляция (DBPSK). Относительная модуляция осуществляется следующим образом. Каждый чип преобразуется в один символ. При поступлении 0 преобразователь символов (symbol mapper) передает тот же символ, который передавался в предыдущий период передачи символов. При поступлении 1 преобразователь символов изменяет фазу на 180 градусов, или на π радиан.

Для достижения скорости передачи 2 Мбит/с в созвездии QPSK отображаются два чипа на символ. При этом снова используется относительная модуляция, когда символы этих двух чипов преобразуются в поворот фазы с целью реализации модуляции DQPSK. Четырем возможным вариантам входных данных (00, 01, 10 и 11) соответствует следующие изменения фазы (в градусах): 0, 90, 180 и 270.

Передача как с использованием DBPSK, так и DQPSK приводит к необходимости передавать символы с частотой 11 МГц, но, поскольку при DQPSK каждый символ содержит два чипа, результирующая скорость передачи чипов составляет 22 МГц, что соответствует скорости передачи 2 Мбит/с.

3. Беспроводные локальные сети стандарта 802.11b.

Технология расширения спектра методом прямой последовательности пользуется большим успехом на рынке благодаря ее устойчивости к внешним воздействиям, особенно при наличии помех. Однако она имеет тот же недостаток, что и технология скачкообразной перестройкой частоты - относительно низкая скорость передачи данных. Этим и было обусловлено появление стандартов, обеспечивающих более высокую скорость передачи - 802.11a (рассмотренный выше) и 802.11b.

Стандарт 802.11b появился в 1999 году. Он регламентирует правила использования высокоскоростной (High Rate) технологии расширения спектра методом прямой последовательности (HR-DSSS). Такие системы обеспечивают скорость передачи в локальных беспроводных сетях диапазона 2,4 ГГц до 5,5 и 11 Мбит/с. При этом используется кодирование с использованием комплементарных кодов (complementary code keying, CCK) или технология двоичного пакетного сверточного кодирования (packet binary convolutional coding, PBCC). В технологии HR-DSSS используется та же схема организации каналов, что и в технологии DSSS: полоса частот шириной 22 МГц, 11 каналов, 3 неперекрывающихся, диапазон 2,4 ГГц. Рассмотрим, как достигаются эти повышенные скорости передачи.

Подуровень PLCP технологии HR-DSSS стандарта 802.11b.

Процедура PLCP (определения состояния физического уровня) технологии расширения спектра методом прямой последовательности технологии (HR-DSSS) использует фреймы PPDU двух типов: длинный и короткий. Преамбула и заголовок длинного фрейма подуровня PLCP технологии HR-DSSS всегда передаются со скоростью 1 Мбит/с для обеспечения совместимости с обычной технологией DSSS. Действительно, длинный фрейм подуровня PLCP технологии HR-DSSS почти такой же, как фрейм подуровня PLCP в технологии DSSS, но с небольшими расширениями, обеспечивающими повышенную скорость передачи данных. Эти расширения следующие:

- в подполе Signal могут быть указаны дополнительные скорости передачи данных (5.5 Мбит/с и 11 Мбит/с)
- подполе Service определяет ранее зарезервированные биты;
- подполе Length по-прежнему указывает количество микросекунд, необходимых для передачи PSDU.

Короткий фрейм PLCP PPDU обеспечивает минимизацию числа служебных сигналов, позволяющих передатчику и приемнику связываться друг с другом. Короткий фрейм, используемый в высокоскоростной технологией стандарта 802.11b, показан на рис. 5.5. Он использует те же преамбулу, заголовок и формат PSDU, но заголовок PLCP передается на скорости 2 Мбит/с, в то время как PSDU передается со скоростью 2, 5.5 или 11 Мбит/с. Кроме того, его подполя модифицированы следующим образом:

- ширина поля Sync сокращена со 128 до 56 бит. Оно представляет собой строку, состоящую из одних нулей;
- поле SFD имеет ширину 16 бит и выполняет ту же функцию указания на начало фрейма, но также указывает на использование длинных или коротких заголовков. В случае коротких заголовков 16 бит передается в порядке, обратном по отношению к длинным заголовкам.

Преамбула I	a PLCP	Заголовок PLCP				1
Syns	SFD	Signal	Service	Length	CRC	МАС-фрейм
56 бит	16 бнт	8 бнт	8 бнт	16 бнт	16 бнт	

Рис. 5.5. Короткий РРDU фрейм технологии HR-DSSS стандарта 802.11b.

Так же как и физический уровень стандарта 802.11, PLCP преобразует весь PPDU посредством аналогичной операции скремблирования, которая применяется в стандарте 802.11, на подуровне PMD.

Модуляция комплементарных кодов на подуровне PMD стандарта 802.11b.

Мы видели, что для передачи со скоростями 1 и 2 Мбит/с применяется 11разрядный расширяющий код Баркера. Рассмотрим механизм расширения спектра, используемый для получения скоростей 5,5 и 11 Мбит/с при использовании модуляции комплементарных кодов (complementary code keying, CCK). Теперь расширяющий код состоит из 8 комплексных чипов (complex chip) и определяется 4 или 8 битами - в зависимости от скорости передачи данных. Скорость передачи чипов составляет 11 Мчип/с. Таким образом, при 8 комплексных чипах на символ и 4 или 8 битах на символ достигается скорость передачи данных 5.5 и 11 Мбит/с.

Чтобы передавать данные со скоростью 5.5 Мбит/с скремблированный поток битов группируется в символы по 4 бита (b0, b1, b2 и b3). Последние два бита (b2 и b3) определяют 8 последовательностей комплексных чипов, как показано в табл. 5.1, где {c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7, c8} - чипы последовательности, j – мнимая единица.

(b2, b3)	c 1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8
00	j	1	j	-1	j	1	-j	1
01	-j	-1	-j	1	j	1	-j	1
10	-j	1	-j	-1	-j	1	j	1
11	j	-1	j	1	-j	1	j	1

Таблица 5.1. Последовательность чипов ССК.

Имея последовательность чипов, определенную битами (b2 и b3), можно использовать первые два бита (b0, b1) для определения поворота фазы, осуществляемого при дифференциальной четверичной фазовой модуляции (DQPSK), который будет применен к модулируемой последовательности (см. табл. 5.2). Необходимо также пронумеровать каждый 4-битовый символ PSDU, начиная с 0, чтобы можно было определить, преобразуется четный либо нечетный символ в соответствии с этой таблицей. В стандарте используется дифференциальная DQPSK модуляция, а не обычная QPSK модуляция. Поэтому представленные в таблице изменения фазы отсчитываются по отношению к предыдущему символу или, в случае первого символа подполя PSDU, по отношению к последнему символу предыдущего DQPSK символа, передаваемого со скоростью 2 Мбит/с. Этот поворот фазы применяется по отношению к 8 комплексным чипам символа. Затем осуществляется модуляция на несущей частоте. Напомним, что PSDU (сокращение от PLCP service data unit) – это MAC-фрейм, который во WLANсетях называется также служебным элементом данных подуровня PLCP.

(b0, b1)	Изменение фазы четных символов, град	Изменение фазы нечетных символов, град
00	0	180
01	90	-90
10	180	0
11	-90	90

Таблица 5.2. Поворот фазы при модуляции ССК.

Для передачи данных со скоростью 11 Мбит/с, скремблированная последовательность битов PSDU разбивается на группы по 8 символов. Последние 6 битов выбирают одну последовательность, состоящую из 8 комплексных чипов, из числа 64 возможных последовательностей, так же, как использовались биты (b2 и b3) для выбора одной из четырех возможных последовательностей. Биты (b0, b1) используются таким же образом, как при модуляции ССК на скорости 5,5 Мбит/с для поворота фазы последовательности и дальнейшей модуляции на несущей частоте.

Модуляция при двоичном пакетном сверточном кодировании (РВСС).

Высокоскоростной стандарт HR-DSSS определяет также опциональный механизм модуляции для передачи данных со скоростью 5.5 и 11 Мбит/с. Такая модуляция отличается как от CCK, так и от DSSS стандарта 802.11. Вначале скремблированные биты PSDU передаются на двоичный сверточный кодер со скоростью кодирования ¹/₂, который имеет шесть линий задержки (или запоминающих ячеек), и выдает 2 бита на каждый входной бит. Поскольку стандарт 802.11 рассчитан на использование фреймов и сверточные кодеры имеют память, все элементы задержки обнуляются с началом фрейма, а в его конец добавляется 8 нулей.

Кодированный поток битов пропускается через преобразователь символов (symbol mapper) BPSK, чтобы достичь скорости передачи данных 5.5 Мбит/с, или через преобразователь символов QPSK, чтобы реализовать передачу со скоростью 11 Мбит/с. Преобразование символов, используемое в данном случае, зависит от двоичного значения, s, поступающего от 256-битовой псевдослучайной последовательности. Как преобразуются два символа QPSK, показано на рис. 5.8 (слева), а как преобразуются два символа BPSK - на рис. 5.6 (справа). Для PSDU размером более 256 бит псевдослучайная последовательность просто повторяется.



Рис. 5.6. Преобразование символов PBCC BPSK (слева) и QPSK (справа) высокоскоростного стандарта 802.11b.

Уровни мощности и спектр излучаемого сигнала (спектральная маска).

Уровень излучаемой мощности не должен превышать 1000 мВт (США), 100 мВт при условии изотропно-излучаемой мощности (Европа), 10 мВт/МГц (Япония).

Спектральная плотность мощности передаваемого сигнала должна быть в пределах спектральной маски, в соответствии с которой спектр может быть прямоугольным в диапазоне частот шириной до 22 МГц. В диапазонах частот (f_c -22 МГц < $f < f_c$ -11 МГц); (f_c +11 МГц < $f < f_c$ +22 МГц) спектральные составляющие не должны превышать уровня – 30 дБ относительно максимума (f_c – несущая частота). Вне этих частот уровень спектра не должен быть выше уровня -50 дБ. Отклонение несущей частоты не должно превышать ±25×10⁻⁶. Спектральная маска стандарта 802.11b показана на рис. 5.7.

На рис. 5.8 показаны спектральные маски излучения для 11 каналов, используемых в США. Видно, несмотря на наличие 11 каналов, на самом деле только три из них (1, 6 и 11) не перекрывают друг друга.



Рис. 5.7. Спектральная маска стандарта 802.11b.



Рис. 5.8. Неперекрывающиеся каналы стандарта 802.11b.

Лекция 6. Беспроводные локальные сети стандарта 802.11g. Особенности сетей стандарта 802.11n.

Подуровень процедуры определения состояния физического уровня (PLCP) стандарта 802.11g. Три схемы модуляции стандарта IEEE 802.11g. Физический уровень с расширенным набором скоростей и с использованием OFDM модуляции (ERP-OFDM). Физический уровень с расширенным набором скоростей и с использованием двоичного пакетного сверточного кодирования (ERP-PBCC). Процедура оценки незанятости канала (CCA – clear channel assessment). Особенности локальных сетей стандарта 802.11n.

1. Беспроводные локальные сети стандарта 802.11g.

Стандарт IEEE 802.11g, предложенный в июне 2003 года, определяет технологию физического уровня с увеличенной скоростью передачи (ERP - extended rate PHY) как средство обеспечения скоростей передачи до 54 Мбит/с в диапазоне 2,4 ГГц. Этот стандарт основан на методе OFDM, используемом в стандарте 802.11а. Однако в отличие от стандарта 802.11а он обеспечивает совместимость со стандартом 802.11b. Данная совместимость обеспечивается тем, что устройства, соответствующие стандарту 802.11g, могут изменять скорость передачи данных до значений, меньших, чем регламентированы стандартом 802.11b.

В стандарте IEEE 802.11g определены три схемы модуляции:

- ERP-OFDM (физический уровень с расширенным набором скоростей и с использованием OFDM модуляции).
- ERP-CCK (физический уровень с расширенным набором скоростей и с использованием ССК модуляции).
- DSSS-OFDM (физический уровень с расширением спектра методом прямой последовательности и с использованием OFDM модуляции).

При использовании модуляции ERP-OFDM применяются специально разработанные для этой модуляции механизмы, обеспечивающие скорость передачи 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, и 54 Мбит/с. Обязательными являются скорости 6, 12 и 24 Мбит/с в дополнение к скоростям передачи данных 1; 2; 5,5 и 11 Мбит/с. Стандарт также позволяет опционально использовать двоичное сверточное кодирование (packet binary convolutional coding – PBCC) со скоростями 22 и 33 Мбит/с, и также опционально технологию расширения спектра методом прямой последовательности с передачей на ортогональных частотных поднесущих (DSSS-OFDM) со скоростями 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 и 54 Мбит/с. Рассмотрим изменения, введенные в стандарт для реализации всех трех схем модуляции ERP-OFDM, ERP-PBCC и DSSS-OFDM.

Подуровень процедуры определения состояния физического уровня (PLCP) стандарта 802.11g.

Стандарт 802.11g определяет пять PLCP: 1) с длинной преамбулой; 2) с короткой преамбулой; 3) преамбулой ERP-OFDM; 4) длинной преамбулой DSSS-OFDM; 5) короткой преамбулой DSSS-OFDM. Поддержка первых трех подуровней обязательна, а двух последних - опциональна. В табл. 6.1 приведены различные преамбулы и схемы модуляции, а также скорости передачи данных, которые они поддерживают или с которыми взаимодействуют.

Тип преамбулы	Скорости передачи данных;		
	поддерживают или взаимодействуют		
Длинная	1; 2;, 5,5 и 11 Мбит/с;		
	DSSS-OFDM на всех скоростях OFDM;		
	ERP-PBCC на всех скоростях ERP-PBCC		
Короткая	2;, 5,5 и 11 Мбит/с;		
	DSSS-OFDM на всех скоростях OFDM;		
	ERP-PBCC на всех скоростях ERP-PBCC		
ERP-OFDM	ERP-OFDM на всех скоростях		
Длинная DSSS-OFDM	DSSS-OFDM на всех скоростях		
Короткая DSSS-OFDM	DSSS-OFDM на всех скоростях		

Табл. 6.1. Преамбулы стандарта 802.11g.

Длинная преамбула использует ту же самую длинную преамбулу, что определена для HR-DSSS, но ее поле Service модифицировано так, как показано в табл. 6.2.

Бит	Наименование	Назначение
b0	Зарезервирован	0
b1	Зарезервирован	0
b2	Блокировка генераторов	0 - не заблокированы, 1 - заблокированы
b3	Выбор модуляции	0 - не ERP-PBCC, 1 - ERP-PBCC
b4	Зарезервирован	0
b5	Расширение длины	Для ERP-PBCC
b6	Расширение длины	Для ERP-PBCC
b7	Расширение длины	Для РВСС

Табл. 6.2. Определения полей для ERP Service.

Биты расширения длины определяют число октетов, когда используются режимы РВСС на скорости 11 Мбит/с и ERP-PBCC на скоростях 22 и 33 Мбит/с.

Короткая преамбула так же модифицируется по отношению к аналогичной преамбуле при HR-DSSS, как указано в табл. 6.1.

Преамбула ERP-OFDM использует таковую стандарта 802.11а и расширяет сигнал на дополнительные 6 мкс, в течение которых не происходит никакая передача данных, чтобы сделать пакет длиннее для согласования его с более длинным 16микросекундным синхронизатором SIFS стандарта 802.11а по сравнению с 10микросекундным синхронизатором SIFS стандарта 802.11b.

Формат длинной преамбулы PPDU технологии CCK-OFDM представлен на рис. 6.1. В подполе Rate поля Signal устанавливается скорость 3 Мбит/с. Благодаря такой установке обеспечивается совместимость со станциями, не поддерживающими EPR, потому что они по-прежнему считывают значение поля Length и откладывают передачу, несмотря на то, что не способны демодулировать полезную нагрузку. Заголовок PLCP соответствует заголовку PLCP предварительно определенной длинной преамбулы, но эта преамбула точно такая же, как для режима HR-DSSS. И заголовок, и преамбула передаются со скоростью 1 Мбит/с с использованием DBPSK, а PSDU передается с использованием подходящей скорости передачи данных OFDM. Заголовок скремблируется посредством скремблера HR-DSSS, а символы данных скремблируются с помощью скремблера стандарта 802.11а.



Рис. 6.1. Формат длинной преамбулы PPDU технологии CCK-OFDM.

В формате короткой преамбулы PPDU технологии DSSS-OFDM, аналогично длинной преамбуле DSSS-OFDM, используются короткая преамбула HR-DSSS и заголовок при скорости передачи данных 2 Мбит/с. Посредством скремблера HR-DSSS и символов данных короткая преамбула и заголовок передаются с использованием технологии OFDM и используют скремблер стандарта 802.11а.

Физический уровень с расширенным набором скоростей и с использованием OFDM модуляции (ERP-OFDM).

Как уже отмечалось выше, ERP-OFDM обеспечивает механизм для использования скоростей передачи данных стандарта 802.11а в диапазоне 2,4 ГГц таким образом, что обеспечивается совместимость с технологиями DSSS и HR-DSSS. В дополнение к использованию модуляции OFDM стандарта 802.11а по схеме распределения частот диапазона ERP-OFDM также устанавливает, что центральная частота передачи и тактовая частота символов определяются тем же генератором, который был опциональным для DSSS. Он использует канальный интервал длительностью 20 мкс, но она может быть уменьшена до 9 мкс, если выяснится, что в BSS находятся только устройства ERP.

Физический уровень с расширенным набором скоростей и с использованием двоичного пакетного сверточного кодирования (ERP-PBCC).

Для передачи данных с более высокими скоростями, 22 и 33 Мбит/с, технология двоичного пакетного сверточного кодирования (PBCC) использует тот же механизм, что и на меньших скоростях 5,5 и 11 Мбит/с PBCC, но с использованием восьмеричной фазовой модуляции (8-PCK) вместо QPCK и BPCK для достижения скорости 22 Мбит/с. Скорость 33 Мбит/с достигается за счет применения генератора с частотой 16,5 МГц вместо генератора с частотой 11 МГц. Схема отображения символов для 8-PCK показана на рис. 6.2.



Рис. 6.2. Сигнальное созвездие ERP-PBCC стандарта 802.11g.

Таким образом, что следует иметь в виду относительно стандарта 802.11g, состоит в следующем. Этот стандарт увеличивает поддерживаемые скорости передачи данных в диапазоне 2,4 ГГц до 54 Мбит/с способом, обеспечивающим совместимость со «старыми» устройствами, соответствующими стандарту 802.11b. Если в локальной сети используются только устройства стандарта 802.11g, передача осуществляется с наиболее возможной скоростью. Однако, если в нее вводятся устройства стандарта 802.11b, информация заголовков должна передаваться со скоростями стандарта 802.11b, чтобы их могли понимать эти «старые» устройства. Такое снижение скорости должно выполняться при всех передачах, независимо от того, происходят они между устройствами стандарта 802.11g или стандарта 802.11b.

Оценка незанятости канала (CCA – clear channel assessment).

Различные стандарты семейства 802.11 определяют пять режимов оценки незанятости канала (CCA).

• Решение о незанятости основывается на выявлении в канале энергии, превосходящей некоторое пороговое значение.

- Решение о незанятости основывается на обнаружении сигнала несущей, соответствующей стандарту 802.11.
- Обнаружение несущей и выявление энергии (комбинация способов 1 и 2).
- Обнаружение несущей с сообщениями о том, что среда не занята, если никакой сигнал не обнаружен в течение 3,65 мс.
- Выявление энергии, соответствующей повышенным скоростям передачи на физическом уровне, и обнаружение несущей по способу 3, но применительно к ERP.

В стандарте указано, что процесс ССА должен применять, по крайней мере, один из названных методов.

Приведем таблицу 6.3, в которой даны основные параметры различных технологий, применяемых на физическом уровне стандартов 802.11 и рассмотренных в лекциях. Отметим, что хотя технология FHSS распространялась очень быстро, ее догоняют технологии DSSS и HR-DSSS. В настоящее время пользователи, в основном, переходят к использованию устройств на основе стандартов 802.11а и 802.11g.

	Физический уровень стандартов 802.11				
Параметр	802.11 FHSS	802.11 DSSS	802.11b HR-DSSS	802.11a OFDM	802.11g FHSS
Частотный диапазон, ГГц	2,4	2,4	2,4	5	5
Максимальная скорость передачи данных, Мбит/с	2	2	11	54	54
Тип модуляции	QPSK	GFSK	CCK	OFDM	OFDM

Табл. 6.3. Физический уровень стандартов 802.11

2. Особенности разработки локальных сетей стандарта 802.11п.

С появлением сетевых мультимедийных центров возникают такие задачи, как передача по беспроводной сети потока DVD. Поэтому Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) одобрил создание рабочей группы по разработке стандарта 802.11п. Целью группы стала разработка нового физического уровня (PHY) и уровня доступа к среде передачи (MAC), которые позволили бы достичь реальной скорости передачи данных, как минимум, в 100 Мбит/с. То есть увеличить её в сравнении с существующими сегодня решениями примерно в четыре раза (имеется в виду реальная пропускная способность). Всё это, вместе с обратной совместимостью с существующими стандартами, должно будет не только сделать работу в беспроводных сетях более комфортной, но и обеспечить достаточный запас скорости на ближайшее будущее.

В разработке стандарта 802.11n предлагается пойти эволюционным путём, используя уже проверенные технологии, добавив к ним новые разработки, позволяющие достичь высоких скоростей передачи данных. Например, в стандарте 802.11n предлагается использовать такие "наследственные" технологии, как OFDM (ортогональное частотное мультиплексирование) и QAM (квадратурная амплитудная модуляция). Подобный подход не только обеспечит обратную совместимость, но и снизит стоимость разработки. Новый стандарт не должен мешать работе старых устройств 11а/g, и в то же время, он должен поддерживать высокую скорость работы.

Увеличение физической скорости передачи. Первый способ увеличения скорости передачи данных использует несколько антенн для передатчика и приёмника. Такая технология называется множественным вводом/выводом (MIMO - multiple input multiple output). MIMO системы обеспечивают параллельную передачу множества сигналов, увеличивая тем самым суммарную пропускную способность. Число параллельных каналов зависит от числа антенн и не может превышать минимального числа антенн, используемых для передачи и приема. Чтобы получить физическую скорость 100 Мбит/с, стандарт 802.11n должен поддерживать технологию МІМО не меньше, чем для двух потоков. Второй способ увеличения скорости передачи данных связан с расширением частотного диапазона каждого канала с 20 МГц до 40 МГц.

Изменения коснутся и МАС-уровня, который получит новые функции. Важно понимать, что скорость передачи существенно ограничивается заголовками физического уровня (РНҮ) и задержками. Однако они плохо поддаются улучшению. Более того, заголовки физического уровня РНҮ приходится делать даже больше, чтобы поддержать новые режимы.

В стандарте 802.11n будет введён режим передачи нескольких кадров МАС в блок данных физического уровня (агрегация). Также появляются и блочные подтверждения (Block ACK) на запросы нескольких кадров (BAR). Таким образом, теперь не нужно начинать процедуру передачи отдельно для каждого кадра. Если не использовать блочную передачу, то для скорости 100 Мбит/с потребовались бы 500 Мбит/с на физическом уровне.

Блочная передача данных будет работать в обоих направлениях. Предусматриваются МАС-кадры нового формата, которые позволят создавать пакеты физического уровня с информацией сразу для нескольких клиентов.