



Стандарты 802.11 (Wi-Fi) для беспроводных систем связи

Д.т.н., проф. Ермолаев В.Т., д.ф.-м.н. Флакسمан

Лаборатория физических основ беспроводных технологий
Радиофизический факультет ННГУ им. Н.И. Лобачевского

6 лекций



Содержание лекций.

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



Лекция 1. Введение. Обзор стандартов 802.11 и топологий WLAN

Содержание.

1. Обзор стандартов 802.11.
2. Обзор топологий WLAN.
3. Независимые базовые зоны обслуживания (Ad-hoc сети).
4. Базовые зоны обслуживания с точкой доступа (Access Point -AP).
5. Расширенные зоны обслуживания.
6. Понятие скрытого узла (Hidden Node).



Стандарты 802.11

Семейство стандартов 802.11 определяет различные технологии реализации физического уровня (PHY) для единого логического уровня 802.11 MAC

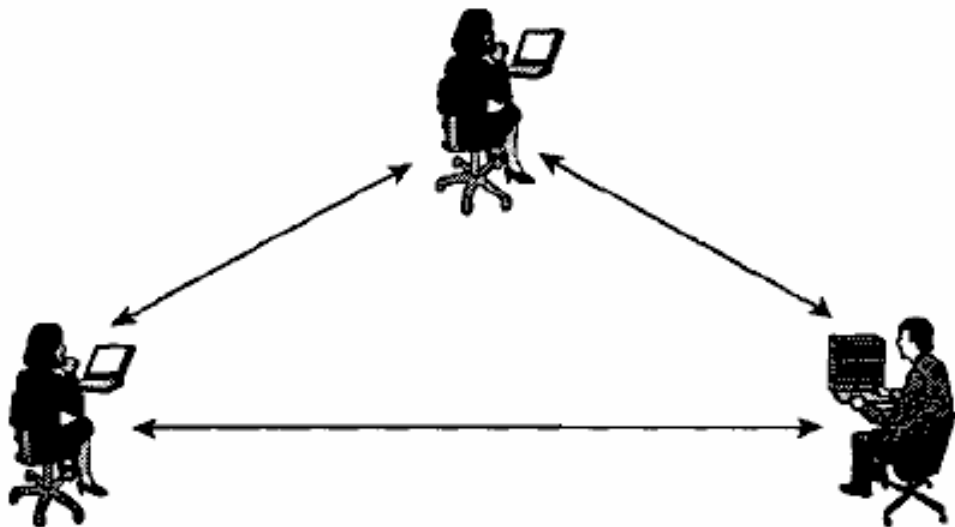
(MAC, Medium Access Control – уровень управления доступом к среде передачи)

1. Стандарт **802.11** - скачкообразная перестройка частоты в диапазоне 2,4 ГГц.
2. Стандарт **802.11** - расширение спектра методом прямой последовательности в диапазоне 2,4 ГГц.
3. Стандарт **802.11b** - расширение спектра методом прямой последовательности в диапазоне 2,4 ГГц.
4. Стандарт **802.11a** - разделение по ортогональным частотам в диапазоне 5 ГГц.
5. Стандарт **802.11g** - расширенный физический уровень в диапазоне 2,4 ГГц.
6. Стандарт **802.11n** - развитие стандарта 802.11a.

Топологии WLAN (I)

1. Независимые базовые зоны обслуживания (Сети **Ad-hoc**)
2. Базовые зоны обслуживания.
3. Расширенные зоны обслуживания.

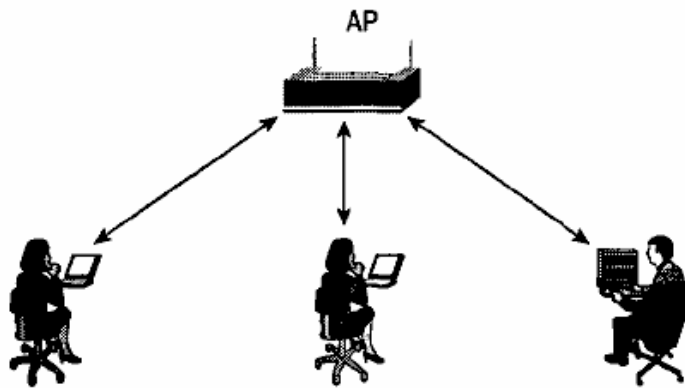
1. Неплановая (Ad-hoc) сеть



Группа станций
связываются друг с другом
непосредственно (без точки
доступа – Access point, AP).

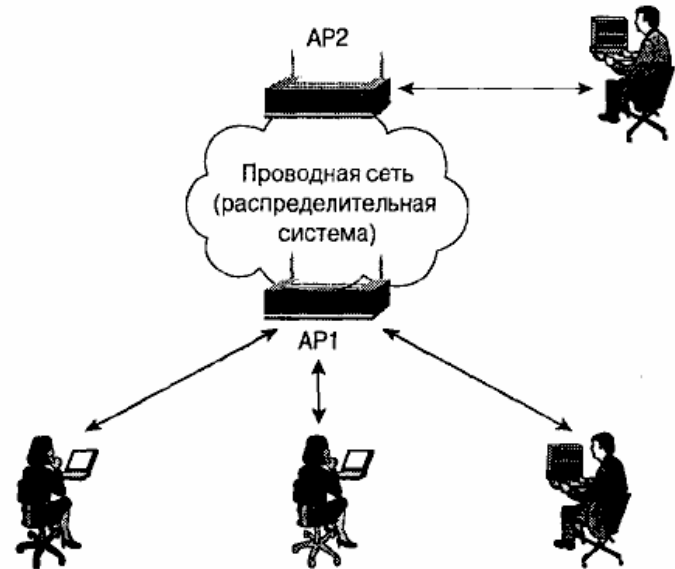
Топологии WLAN(II)

2. Базовые зоны обслуживания.



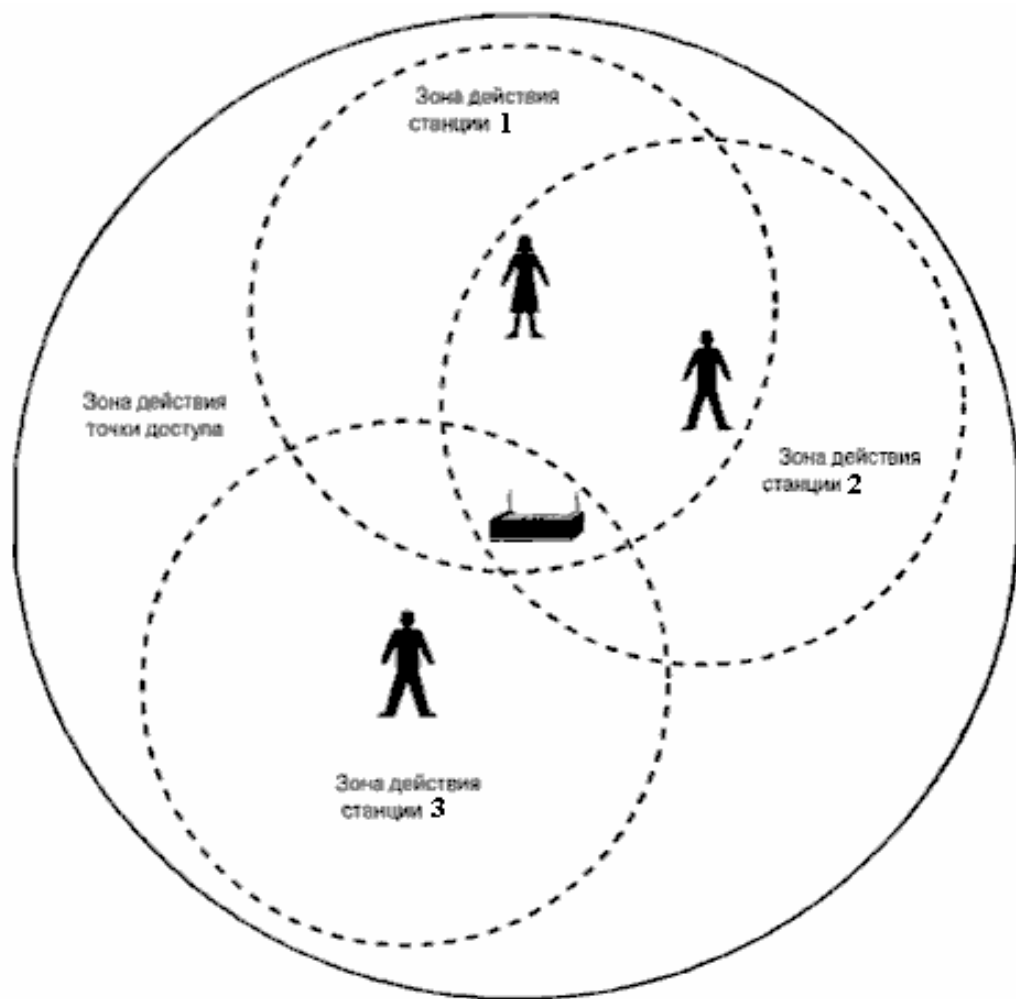
Группа станций, связываются одна с другой через точку доступа (Access point - AP).

3. Расширенные зоны обслуживания.



Несколько базовых зон обслуживания могут соединяться через интерфейсы восходящего канала (обычно в виде проводного Ethernet).

Скрытый узел в сети WLAN



Станции 1 и 2 находятся в зоне действия друг друга и точки доступа (Access point AP), но находятся вне зоны действия станции 3.

Станция 3 находится в зоне действия AP и тоже пытается осуществлять передачу данных через среду.

Станция 3 - **скрытый узел (Hidden Node)**, т.к. она невидима для станций 1 и 2.



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

Содержание.

- 1. Механизм «множественного доступа с контролем несущей и предотвращением коллизий» (CSMA/CA -Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).**
- 2. Контроль несущей (контроль наличия в сети сигнала от некоторой работающей станции).**
- 3. Фрагментация фрейма по стандарту 802.11.**
- 4. Форматы фреймов МАС стандарта 802.11 (управляющие и служебные фреймы, фреймы данных).**
- 5. Функционирование под управлением распределённой координационной функции (DCF -Distributed Coordination Function).**

Множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий

Сценарий механизма CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) по аналогии с селекторным совещанием.

- 1. Прежде чем участник начнет говорить, он сообщает о длительности своей речи. Другие участники узнают, как долго им придется ждать.**
- 2. Участники не могут говорить, пока не истечет время, зарезервированное предыдущим участником для своей речи.**
- 3. Участники не знают, услышан ли их голос, пока они не получат подтверждение по окончании речи.**
- 4. Два участника, начавшие говорить одновременно, не знают, что пытаются перекрыть друг друга. Они определяют это, не получая подтверждения, что их речь услышана.**
- 5. Участники выжидают некоторое случайное время и снова пытаются говорить, если не получают подтверждения, что были услышаны.**



Контроль несущей

Любая станция вначале проверяет сеть. Наличие сигнала в сети означает, что другая станция осуществляет передачу. Станция откладывает свою передачу до момента освобождения среды.

Два метода определения состояния среды:

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

Станция обновляет вектор NAV только тогда, когда полученное значение поля продолжительности превышает значение, хранимое в ее векторе NAV.

Пример. Значение вектора NAV станции = 10 мс. Станция не обновит свой вектор NAV, получив фрейм со значением поля продолжительности 5 мс. Станция обновит свой вектор NAV, получив фрейм со значением поля продолжительности 20 мс.

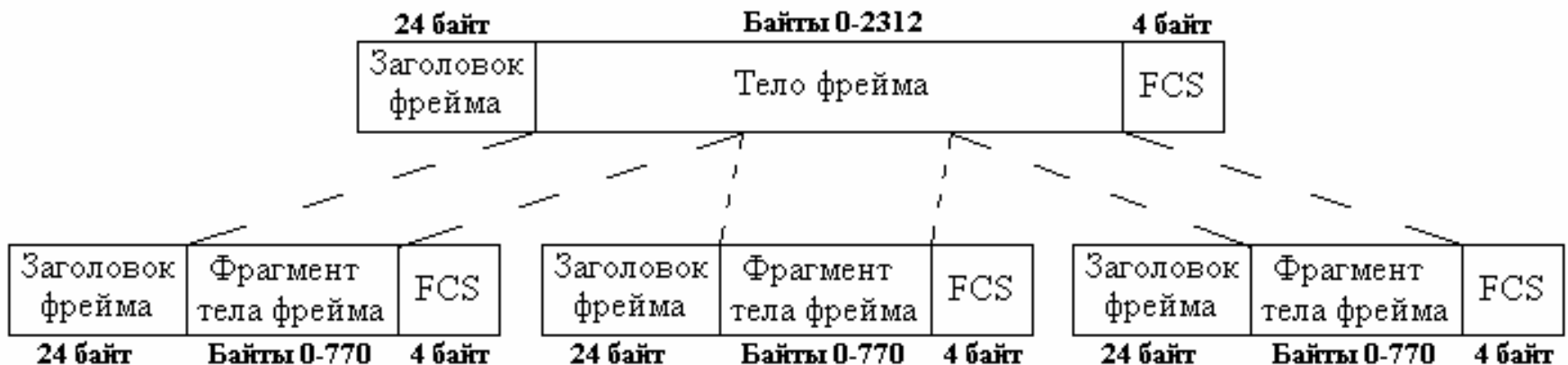
Фрагментация фрейма

Фрагментация - дробление фрейма на меньшие фрагменты с отдельной передачей каждого из них.

Фрагментация возможна только для одноадресных фреймов.

Фрагментация повышает надежность передачи через беспроводную среду, но увеличивает «накладные расходы» MAC за счет увеличения числа служебных сигналов MAC-протокола (заголовок фрейма, FCS).

Фрагменты фрейма передаются пакетом (используется одна итерация механизма доступа к среде).



FPS (frame check sequence) - контрольная последовательность фрейма



Форматы фреймов МАС-уровня. Основной фрейм МАС.

Три категории фреймов.

1. Управляющие фреймы (control frames). Управляют передачей фреймов данных при нормальном обмене информацией станциями стандарта 802.11.
2. Служебные фреймы (management frames). Обеспечивают соединения беспроводных локальных сетей и аутентификацию.
3. Фреймы данных (data frames). Переносят данные от передающей станции к приемной.

Все фреймы стандарта 802.11 строятся подобно **основному фрейму**.

| | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------------|---------|---------|---------|-------------------------|---------|--------------|--------|
| Контроль фрейма | Продолжительность (D) | Адрес 1 | Адрес 2 | Адрес 3 | Управление очередностью | Адрес 4 | Тело фрейма | FCS |
| 2 байт | 2 байт | 6 байт | 6 байт | 6 байт | 2 байт | 24 байт | Байты 0-2312 | 4 байт |

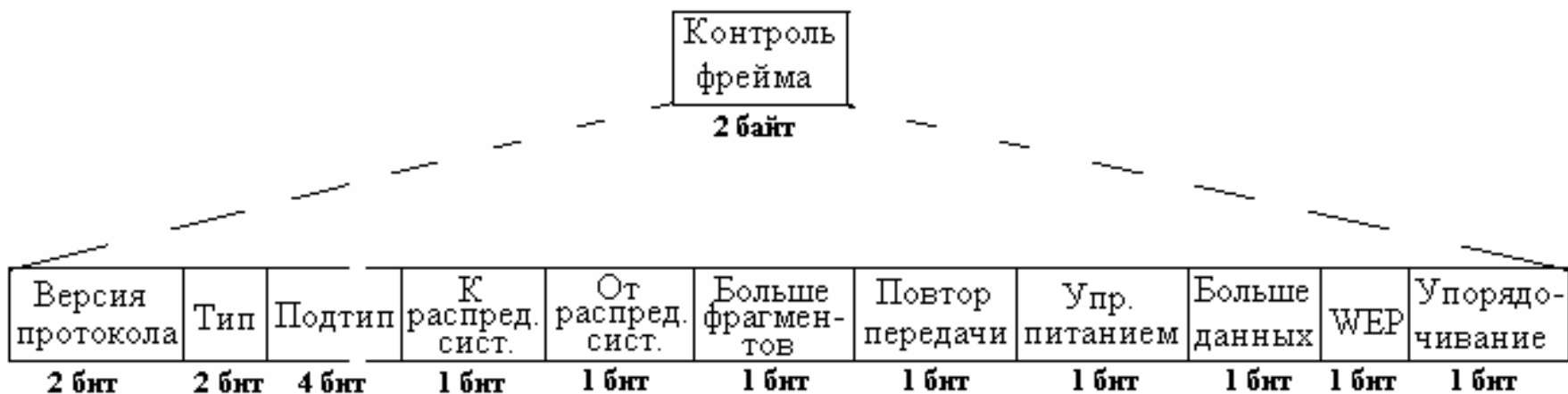
Основной фрейм МАС (FCS - контрольная последовательность фрейма)

Поля основного фрейма MAC-уровня. Поле контроля фрейма.

Размер поля контроля фрейма (frame control) - 2 байта.

Состоит из 11 подполей.

Содержит управляющую информацию, необходимую для функционирования протокола MAC.



Подполя поля контроля фрейма (WEP, Wired Equivalent Privacy – защищенность, эквивалентная защищенности проводных сетей).



Подполя поля контроля фрейма

- Версия протокола (protocol version).** Указывает версию протокола 802.11 MAC.
- Тип (type).** Указывает тип фрейма MAC (управляющий, служебный или данных).
- Подтип (subtype).** Указывает подтип фрейма.
- К распределительной системе (to DS, Distribution System).** Указывает, предназначен ли фрейм для DS.
- От распределительной системы (from DS).** Указывает, получен ли фрейм от DS.
- Больше фрагментов.** Указывает, является ли фрейм только служебным или только фреймом данных, либо следует ожидать других фрагментов.
- Повторная передача.** Указывает, передается ли фрейм повторно.
- Управление питанием.** Указывает режим энергопотребления станции (1 - режим экономии, 0 - активный режим). Фреймы точки доступа имеют значение 0.
- Больше данных.** Оповещают приемную станцию, что имеются предназначенные для нее данные, буферизированные в точке доступа.
- Защищенность.** Указывает, используется ли шифрование WEP для защиты фрейма.
- Параметр упорядочивания.** (1 - фрейм данных использует упорядочивание, в противном случае – 0).



Поля основного фрейма MAC-уровня

Продолжительность/ID (Duration/ID). Указывается время (мкс), на которое требуется выделить канал для передачи фрейма MAC.

Адреса 1, 2, 3 и 4. Эти поля определяются типом и подтипом фрейма. Возможные адреса: источника, назначения, передающей станции, принимающей станции.

Управление очередностью (sequence control). Содержит 4-битовое подполе номера фрагмента, и 12-битовый порядковый номер.

Тело фрейма. Содержит модуль или фрагмент данных (информационные данные или управляющая информация MAC).

FCS (контрольная сумма фрейма) - 32-разрядное значение циклического избыточного контроля (cyclic redundancy check, CRC), вычисленное для всех полей заголовка и тела фрейма MAC.



Управляющие фреймы. Фрейм RTS

Фрейм готовности к передаче (RTS, Request to send) - запрос на резервирование среды. Состоит из следующих подполей:

1. **Контроль фрейма**
2. **Продолжительность (мкс)**. Время, необходимое для передачи **фрейма RTS**, приема фрейма готовности к приему (**фрейм CTS, Clear to send**) (включая короткий межфреймовый промежуток SIFS - Short interframe space), передачи **фрейма данных** (включая SIFS) и приема **фрейма подтверждения** (ACK – Acknowledgment) (включая SIFS).
3. **Адрес приемника**. MAC-адрес предполагаемого получателя фрейма
4. **Адрес передатчика**. MAC-адрес станции-отправителя фрейма.
5. **Контрольная сумма фрейма (FCS)**.

| | | | | |
|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|--------|
| Контроль фрейма | Продолжительность | Адрес приемника | Адрес передатчика | FPS |
| 2 байт | 2 байт | 6 байт | 6 байт | 4 байт |

Формат фрейма RTS.



Управляющие фреймы. Фрейм CTS

Фрейм готовности к приему (CTS, Clear to send) - ответ на фрейм готовности к передаче (RTS, Request to send). Указывает приемной станции, что среда была зарезервирована на указанное время. Состоит из подполей:

1. **Контроль фрейма**
2. **Продолжительность.** Величина, полученная из аналогичного поля, предшествующего фрейма RTS, уменьшенная на время, необходимое для передачи фрейма CTS и на короткий межфреймовый промежуток SIFS.
3. **Адрес приемника.** MAC-адрес предполагаемого получателя фрейма.
4. **Контрольная сумма фрейма (FCS).**

| | | | |
|-----------------|-------------------|-----------------|--------|
| Контроль фрейма | Продолжительность | Адрес приемника | FCS |
| 2 байт | 2 байт | 6 байт | 4 байт |

Формат фрейма CTS.



Управляющие фреймы. Фрейм АСК

Фрейм подтверждения (АСК – Acknowledgment) - подтверждает прием фрейма. Получатель фрейма посылает фрейм АСК отправителю, для уведомления его об успешном приеме. Состоит из подполей:

1. **Контроль фрейма**
2. **Продолжительность.** Обычно 0, так как именно этот фрейм подтверждения содержит время передачи для короткого межфреймового промежутка SIFS и фрейма АСК в своем поле «продолжительность»
3. **Адрес приемника.** MAC-адрес предполагаемого получателя фрейма.
4. **Контрольная сумма фрейма (FCS).**

| | | | |
|-----------------|-------------------|-----------------|--------|
| Контроль фрейма | Продолжительность | Адрес приемника | FCS |
| 2 байт | 2 байт | 6 байт | 4 байт |

Формат фрейма АСК



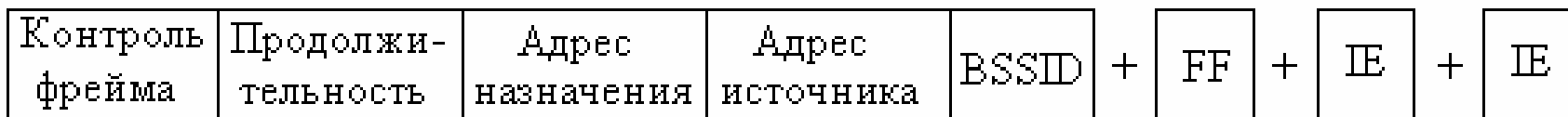
Служебные фреймы MAC-уровня (I)

Служебные фреймы MAC-уровня используют две структуры данных:
информационные элементы (information elements, IE);
фиксированные поля (fixed fields, FF).

Формат информационного элемента

| | | |
|--------------------|--------|------------|
| Контроль фрейма | Длина | Информация |
| 1 байт | 1 байт | |

Структура служебного фрейма с IE и FF.



BSSID, Identification of Basic service set – идентификация базовой зоны обслуживания



Служебные фреймы МАС-уровня (II)

К служебным фреймам МАС-уровня относятся следующие:

1. Сигнальный фрейм.
2. Фрейм запроса на зондирование.
3. Фрейм ответа на зондирование.
4. Фрейм аутентификации.
5. Фрейм деаутентификации.
6. Фрейм запроса на ассоциирование.
7. Фрейм ответа на ассоциирование.
8. Фрейм запроса на реассоциирование.
9. Фрейм ответа на реассоциирование.
10. Фрейм диссоциирования.
11. Фрейм индикации объявленного трафика.



Фрейм данных

Формат фрейма данных.

| | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|------------------|--------|-----------------|-------------------------|-------------------|--------|
| Контроль фрейма | Продолжительность | Адрес назначения | BSSID | Адрес источника | Управление очередностью | Полезная нагрузка | FPS |
| 2 байт | 2 байт | 6 байт | 6 байт | 6 байт | 2 байт | 0 - 2312 байт | 4 байт |

BSSID, Identification of Basic service set – идентификация базовой зоны обслуживания

FPS (frame check sequence) - контрольная последовательность фрейма

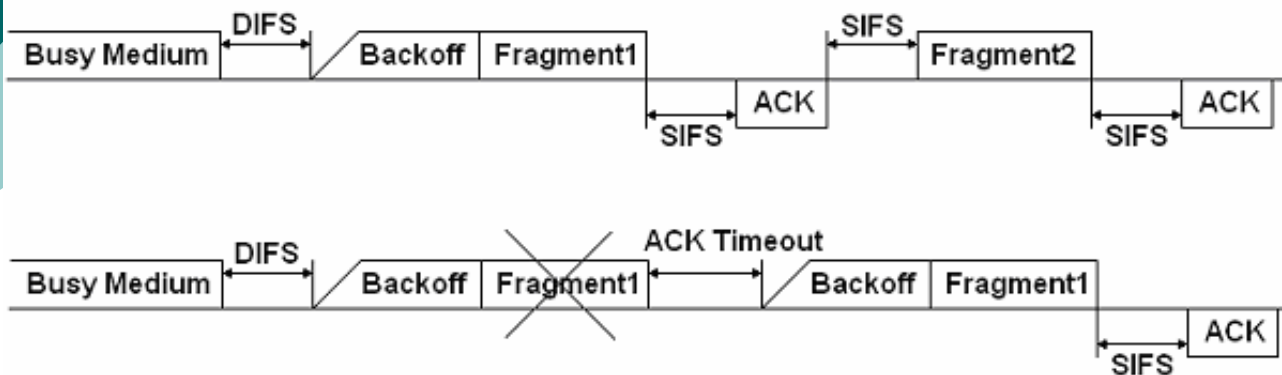


Распределённая координационная функция (DCF)

Функция **DCF** (Distributed Coordination Function) реализует механизм множественного доступа с контролем несущей и предотвращением коллизий (**CSMA/CA** – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).

Станция, работающая под управлением DCF, следует двум правилам:

- 1) Начинает передачу, если канал свободен в течение интервала DIFS (Interframe space DCF – межфреймовый промежуток функции DCF).
- 2) Откладывает передачу на случайное время для уменьшения вероятности коллизий.



Backoff («откат» - процедура повторной попытки передачи при занятой среде)

Последовательность обмена при успешной передаче и потере фрагмента



Лекция 3. Механизм доступа к среде стандарта 802.11 (уровень MAC).

Содержание.

- 1. Принцип передачи данных в OFDM-системе.**
- 2. Структурная схема OFDM-системы связи стандарта 802.11a и назначение отдельных блоков.**
- 3. Основные параметры стандарта 802.11a.**
- 4. Структура фрейма.**
- 5. Временная и частотная структура субфреймов “PREAMBLE”, “SIGNAL” и “DATA”.**
- 6. Математическое описание сигналов фрейма.**

Принцип передачи данных в OFDM-системе

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

- обратное преобразование Фурье (IFFT) на передаче

d_k – информационный символ на k -ой поднесущей, n – дискретное время, N_F – число точек IFFT.
В канал излучается смесь $c(n)$ всех информационных символов.

$$x(n) = hc(n) + z(n)$$

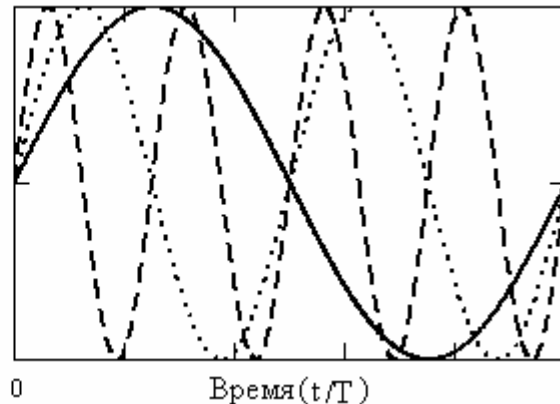
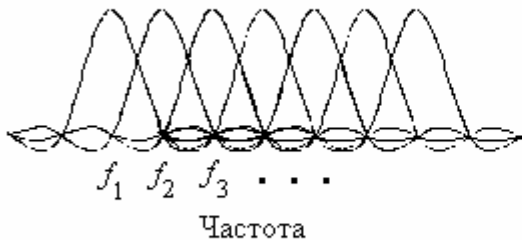
- принятый символ

(h – коэффициент передачи неселективного по частоте канала $z(n)$ – шум)

$$g_m = \sum_{n=1}^{N_F} [hc(n) + z(n)] \cdot \exp(j2\pi f_m n\Delta t)$$

- прямое преобразование Фурье (FFT) на приеме

Условие ортогональности поднесущих: $\Delta f = 1/(2T)$, T – длительность символов

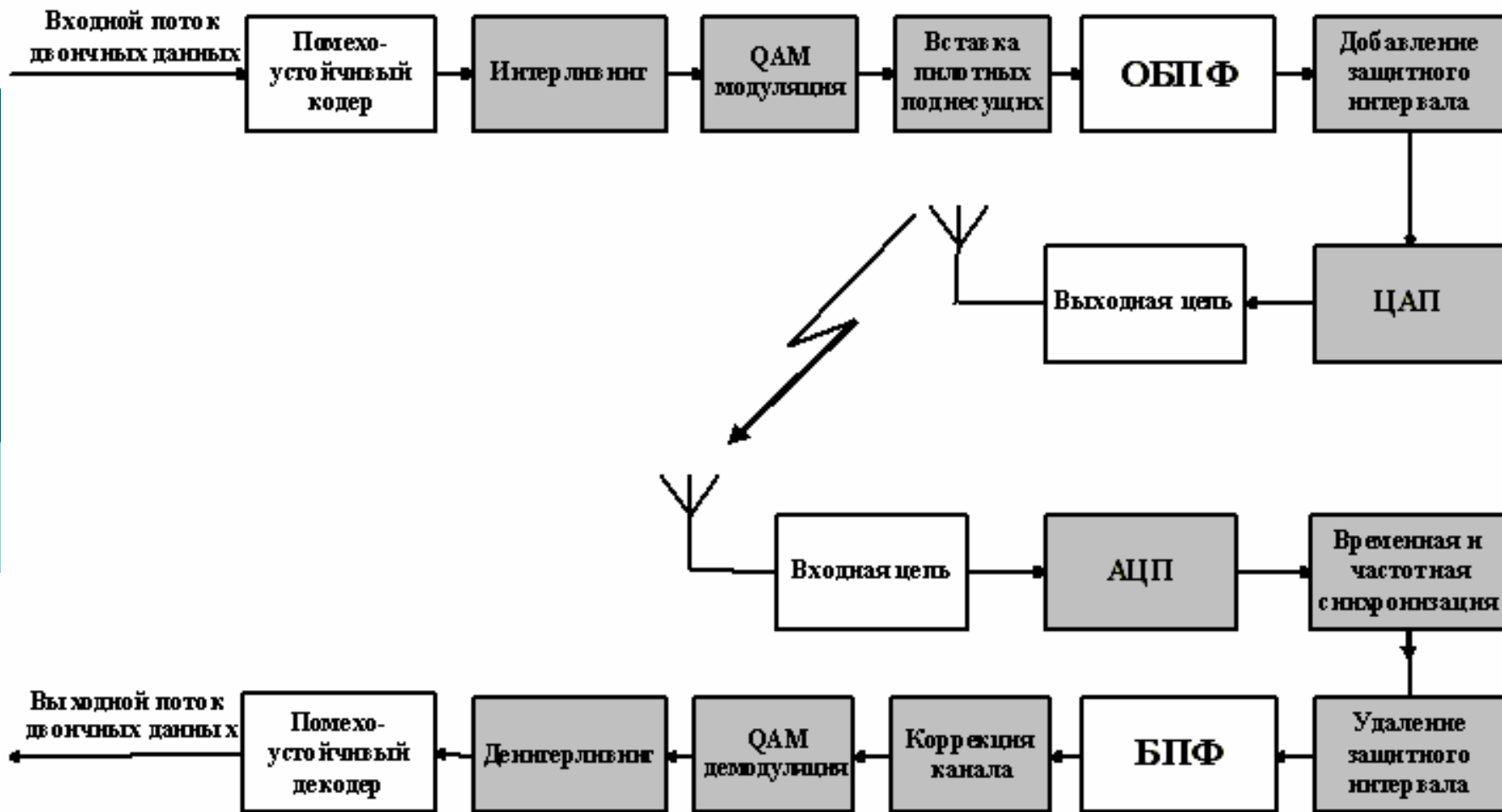


Символы разделяются на приемнике

$$g_m = N_F h d_m + \eta_m$$

η_m – шум на m -ой поднесущей

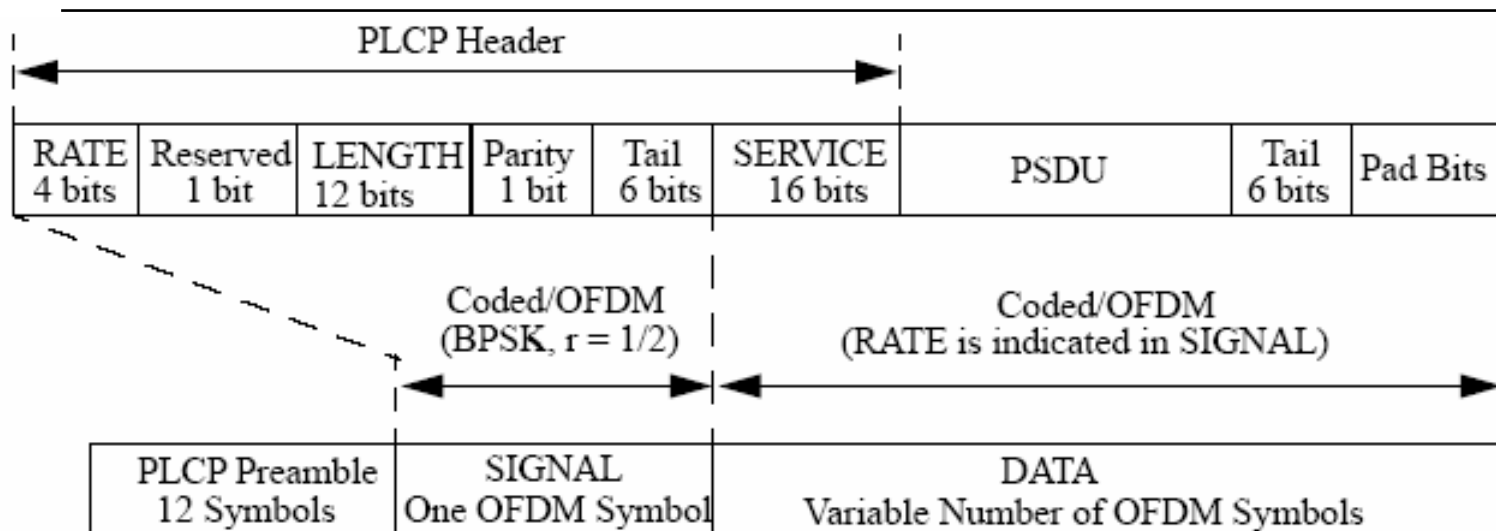
Структурная схема OFDM-системы связи стандарта 802.11a



Основные параметры стандарта 802.11a

| 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, Δ_F | 0.3125 МГц (=20 MHz/64) |
| Период Фурье преобразований, T_{FFT} | 3.2 мкс ($1/\Delta_F$) |
| Размерность Фурье преобразований | 64 |
| Длительность преамбулы ($T_{PREAMBLE}$) | 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 ($T_{FFT}/4$) |
| Длительность короткой тренирующей послед-ти (T_{SHORT}) | 8 мкс ($10 \times T_{FFT}/4$) |
| Длительность длинной тренирующей послед-ти (T_{LONG}) | 8 мкс ($2 \times T_{GI} + 2 \times T_{FFT}$) |

Структура фрейма стандарта

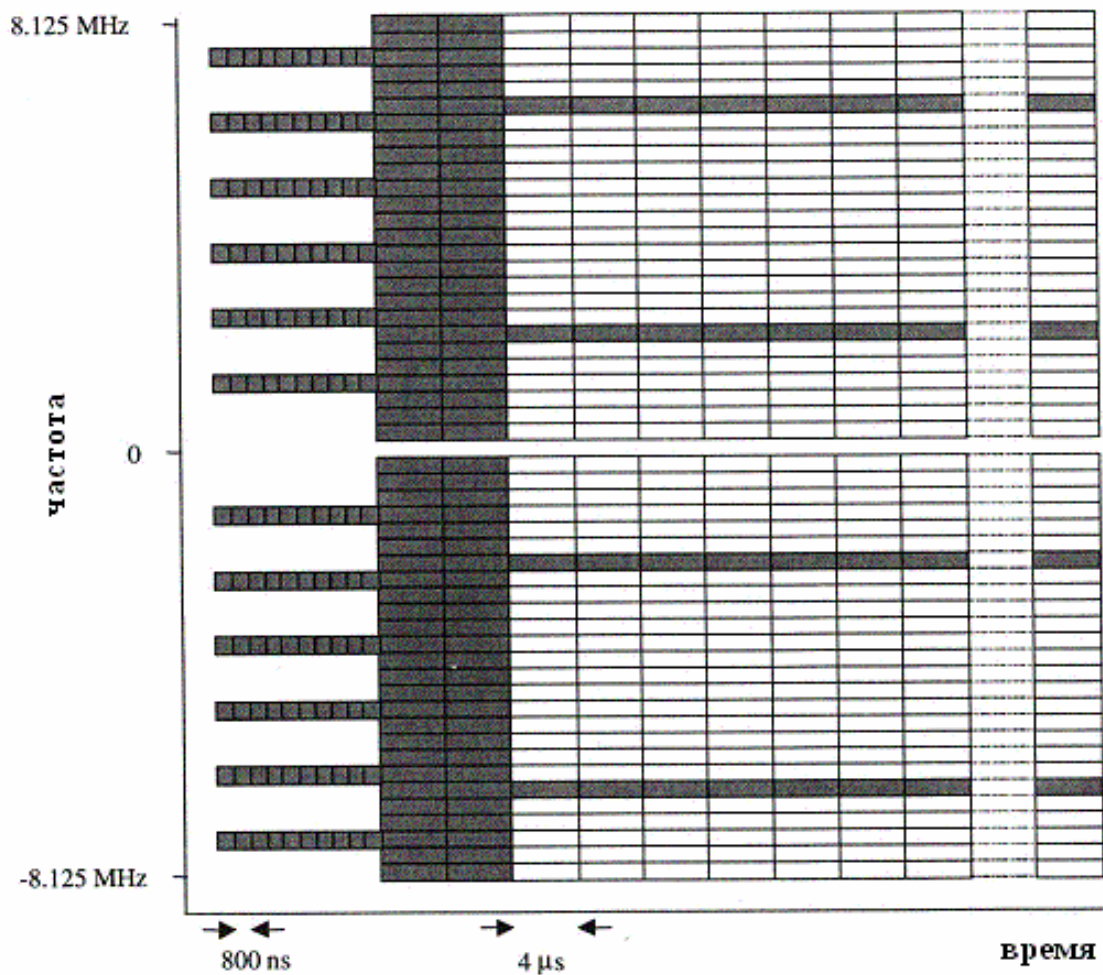


Фрейм

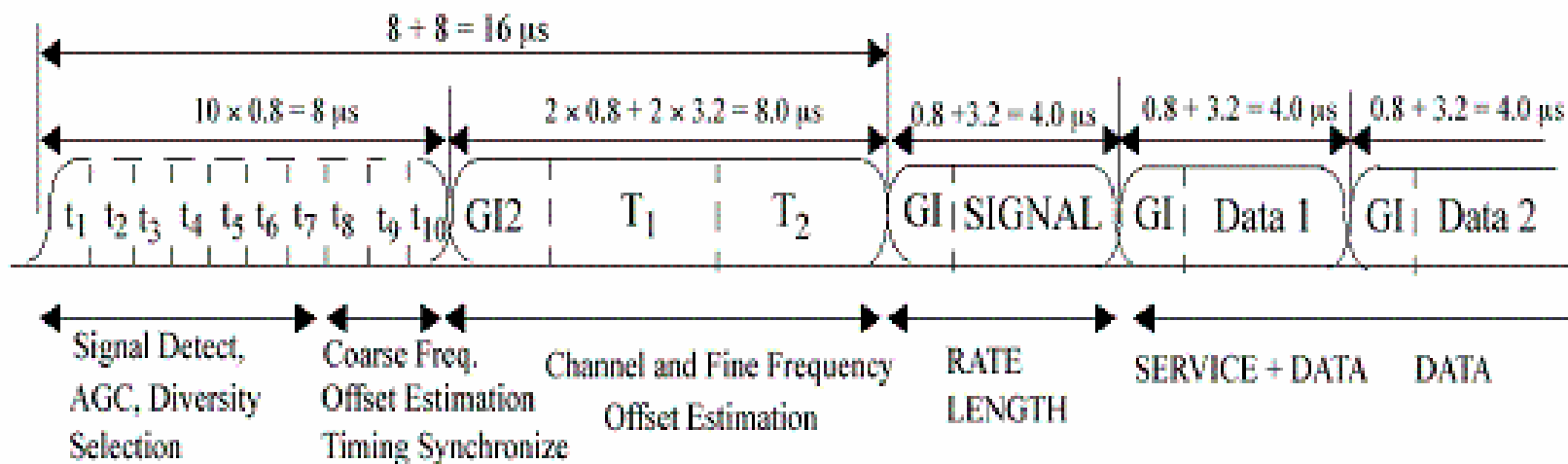
Стандарт 802.11a определяет пакетный (фреймовой) режим передачи данных. Фрейм состоит из трех основных частей (субфреймов):

- 1) преамбулы (“PREAMBLE”),
- 2) поля “SIGNAL”
- 3) передаваемых данных (“DATA”).

Частотная структура фрейма



Временная структура преамбулы и заголовка фрейма (I)



Преамбула имеет длительность 16 мкс и состоит из:

- **10 коротких тренирующих OFDM-символов** длительностью 0.8 мкс каждый.

Назначение - детектирование (определения наличия) сигнала, синхронизация и грубая оценка сдвига частоты между приемником и передатчиком;

- **2 длинных тренирующих OFDM-символа (T1, T2) вместе с удвоенным защитным интервалом G12** общей длительностью 8.0 мкс.

Назначение – точная оценка частоты и частотной характеристики пространственного канала.

Для передачи преамбулы используется BPSK-модуляция с темпом 1/2.

Расстройка частоты между приёмником и передатчиком (после точной подстройки) не должна превышать 2×10^{-5} (0,002%) от несущей частоты



Временная структура преамбулы и заголовка фрейма (II)

| RATE (4 bits) | | | | | LENGTH (12 bits) | | | | | | | | | | | | | SIGNAL TAIL (6 bits) | | | | | |
|------------------|----|----|----|---|---------------------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|-----|----|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| R1 | R2 | R3 | R4 | R | LSB | | | | | | | | | | | MSB | P | “0” | “0” | “0” | “0” | “0” | “0” |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |

Заголовок фрейма состоит из 24 бит.

Первые 4 бита (R1 - R4) из поля “RATE” - для сообщения об используемом темпе передачи данных.

5-ый бит зарезервирован.

Следующие 12 бит (поле “LENGTH”) - для сообщения о длительности данных во фрейме.

18-ый бит – бит четности.

Последние 6 бит (поле “SIGNAL TAIL”) – нулевые биты для приведения регистров декодера в нулевое состояние.

Для передачи субфрейма “SIGNAL” используется BPSK-модуляция с темпом 1/2.

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



Субфрейм данных

Состоит из четырех полей (см. слайд 27): **SERVICE, PSDU, TAIL, Pad Bits**.

Все биты подвергаются операции шифрования (scrambling) путем их перестановки.

Поле **SERVICE** состоит из 16 бит. Первые 7 бит (нулевые биты) 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 передаваемые данные. Его длительность является переменной и может достигать **3 мсек**.

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 данных (PSDU) была бы кратной числу кодированных бит

в OFDM-символе. Для этого длина сообщения должна быть увеличена с помощью специальных дополнительных нулевых биты (так называемые “набивочные” биты),

объединенные в поле PAD.



Математическое описание сигналов фрейма (I)

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

- передаваемый OFDM-сигнал

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

- узкополосная
комплексная огибающая

$t_{\text{SIGNAL}} = 16$ мкс и $t_{\text{DATA}} = 20$ мкс - задержки для передачи субфрейма “SIGNAL” и субфрейма “DATA”.

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

- формирование субфреймов “PREAMBLE”, “SIGNAL” и “DATA” с помощью обратного преобразования Фурье от набора соответствующих коэффициентов C_k

$\Delta_f = 0.3125$ МГц - разнос соседних поднесущих, $N_{ST} = 52$ – полное число поднесущих. $T_{\text{FFT}} = 1/\Delta_f = 3.2$ мкс - период сигнала. Защитный интервал $T_{\text{GUARD}} = 1.6$ мкс ($2 \times \text{TGI}$) для длинной тренирующей последовательности, $T_{\text{GUARD}} = 0.8$ мкс (TGI) - для данных.

$$w_{T\text{-SUBFRAME}}(t)$$

- функция «окна», описывающая форму соответствующего сигнала.



Математическое описание сигналов фрейма (II)

Короткие тренирующие символы поля “PREAMBLE” передаются на 12 из 52 поднесущих (номера 3, 7, 11, 15, 19, 23, 31, 35, 39, 43, 47 и 51) с разносом соседних частот $4\Delta F$. Соответствующий сигнал имеет период равный $1/(4\Delta F)$. Разреженные частоты ортогональны на временном интервале 0.8 мкс.

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

$w_{T-SHORT}(t)$ – функция огибающей

$S=1.47 \times (0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0)$ -

- 53-мерный вектор амплитуд сигналов на поднесущих (с нулевой амплитудой на нулевой частоте), 1.47 - нормирующий множитель.

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

$w_{T-LONG}(t)$ – функция огибающей импульса, $T_{G12}=1.6$ мкс, а $T_{LONG}=(1.6+2 \times 3.2)=8$ мкс.

$L=(1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1)$ - 53-мерный вектор амплитуд сигналов на поднесущих

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

где задержка $t_{SHORT}=8$ мкс.



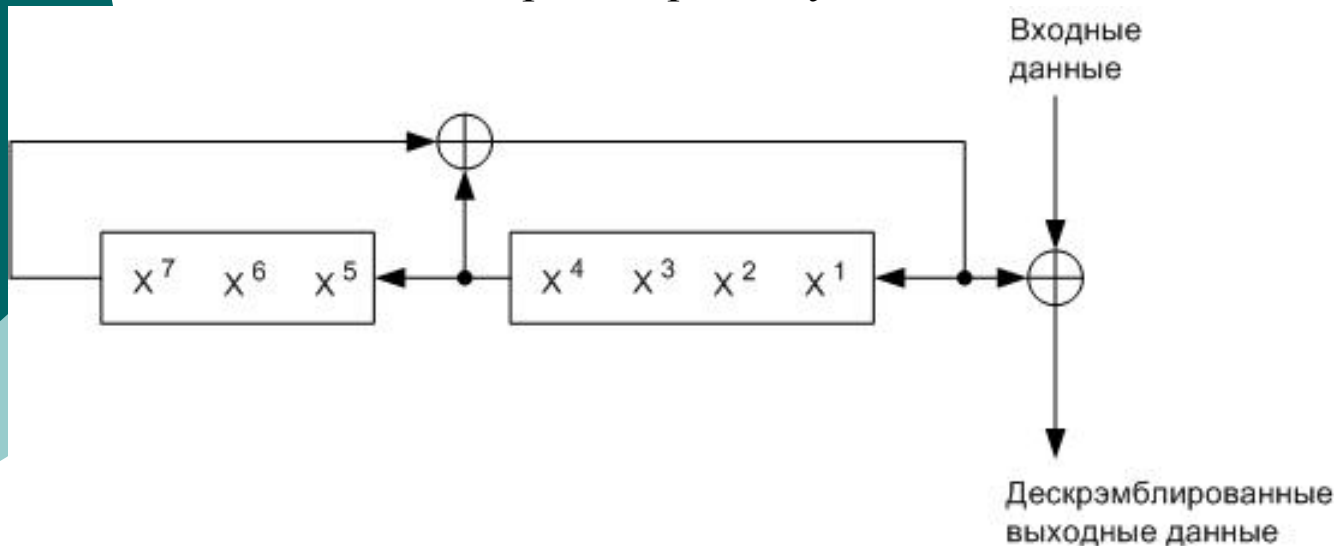
Лекция 4. Формирование фрейма физического уровня

Содержание.

1. Шифрование/дешифрование данных.
2. Сверточное кодирование и перфорирование (punchuring).
3. Перемежение данных (interleaving и deinterleaving).
4. Модуляция данных.
5. Используемые диапазоны частот (channelization).
6. Уровни мощности передатчика.
7. Спектр излучаемого сигнала (спектральная маска).
8. Требуемая вероятность фреймовых (пакетных) ошибок.
Чувствительность приемника.

Шифрование/дешифрование данных (скремблер стандарта 802.11a)

Скремблер используется на передающей стороне для шифрования и на приемной стороне для дешифрования. Сначала скремблер на передающей стороне инициализируется псевдослучайной ненулевой последовательностью. Семь первых битов поля SERVICE должны быть нулевыми, чтобы дескремблер смог оценить исходное состояние скремблера и осуществить адекватное дешифрование.



Длина скремблера - 127

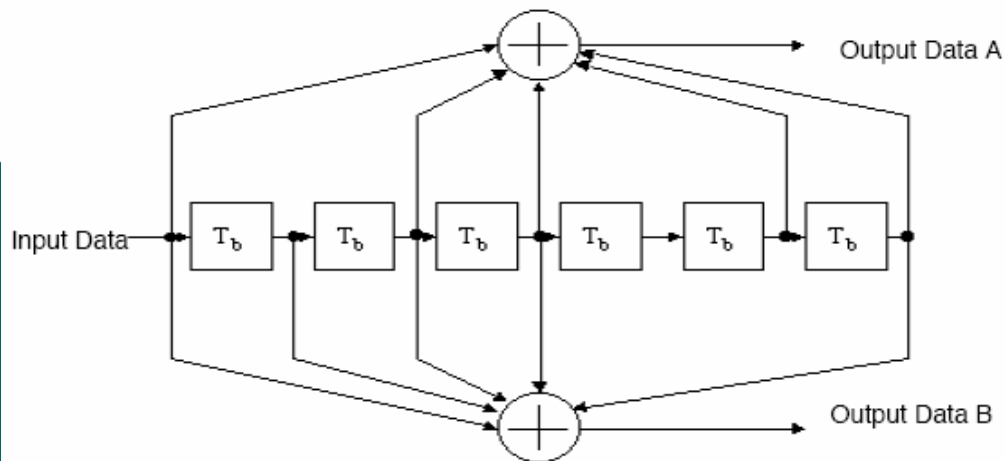
Образующий полином

$$S(x) = x^7 + x^4 + 1$$

00001110 11110010 11001001 00000010 00100110 00101110 10110110 00001100
11010100 11100111 10110100 00101010 11111010 01010001 10111000 11111111

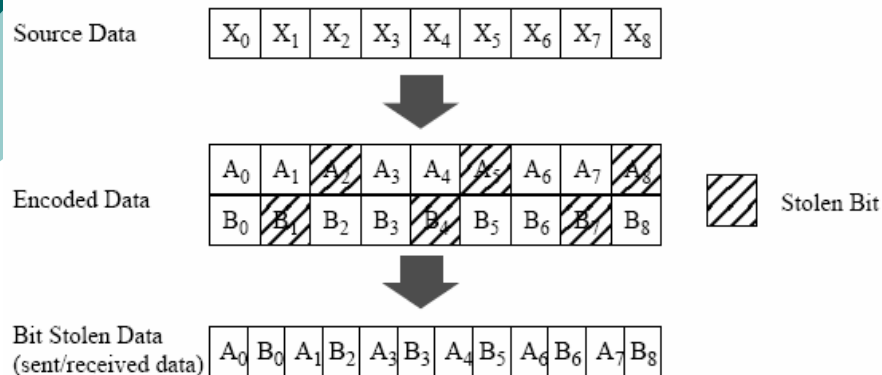
- повторяющаяся 127 битная последовательность, генерируемая скремблером (левый бит используется первым) при условии, что исходным является состояние 11111111

Сверточное кодирование и перфорирование (punchuring).



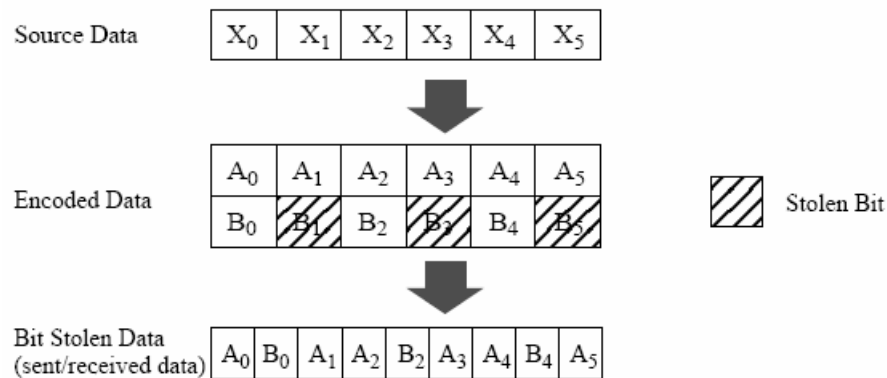
Сверточный кодер:
 кодовое ограничение $K=7$,
 темп кодирования $R=1/2$,
 генераторные полиномы кодера:
 выход А - $g_A=133_8$ (10110112)
 выход В - $g_B=171_8$ (11110012).

Punctured Coding ($r = 3/4$)



Формирование темпа кодирования $R=3/4$

Punctured Coding ($r = 2/3$)



Формирование темпа кодирования $R=2/3$



Перемежение данных (interleaving и deinterleaving)

Все кодированные биты данных подвергаются перестановке блочным интерливером (англ. **interleave** – **перестанавливать, перемешивать**). Размер блока интерливера соответствует количеству кодированных бит на OFDM символ. Данная информация берется из поля RATE заголовка фрейма.

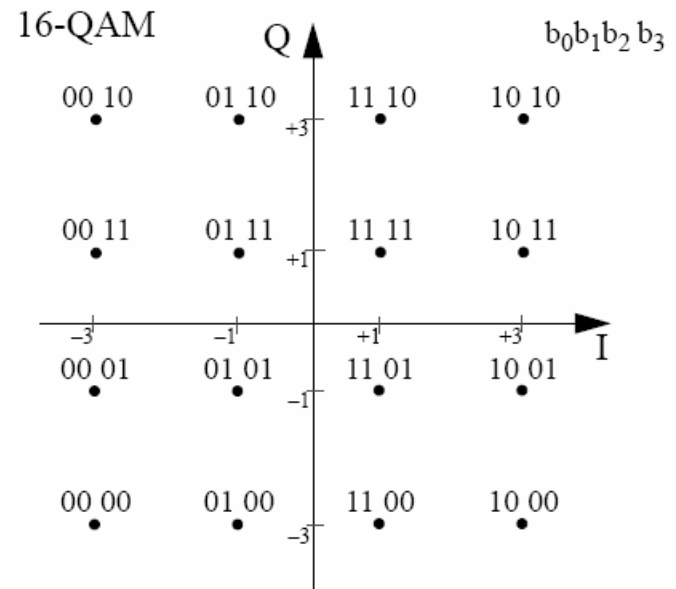
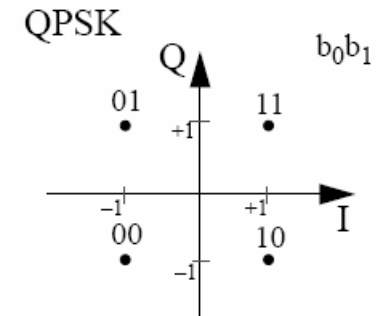
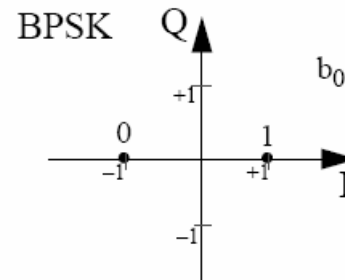
Интерливер осуществляет **двухфазовую перестановку битов**.

Первая фаза используется для того, чтобы смежные биты исходной последовательности находились бы на разных (несмежных) поднесущих.

Вторая фаза используется для того, чтобы смежные биты исходной последовательности были перенесены попеременно на менее и более старшие разряды сигнального созвездия отображения символов (в созвездиях высшего порядка самые младшие биты часто передаются с меньшей надежностью).

Модуляция данных (I)

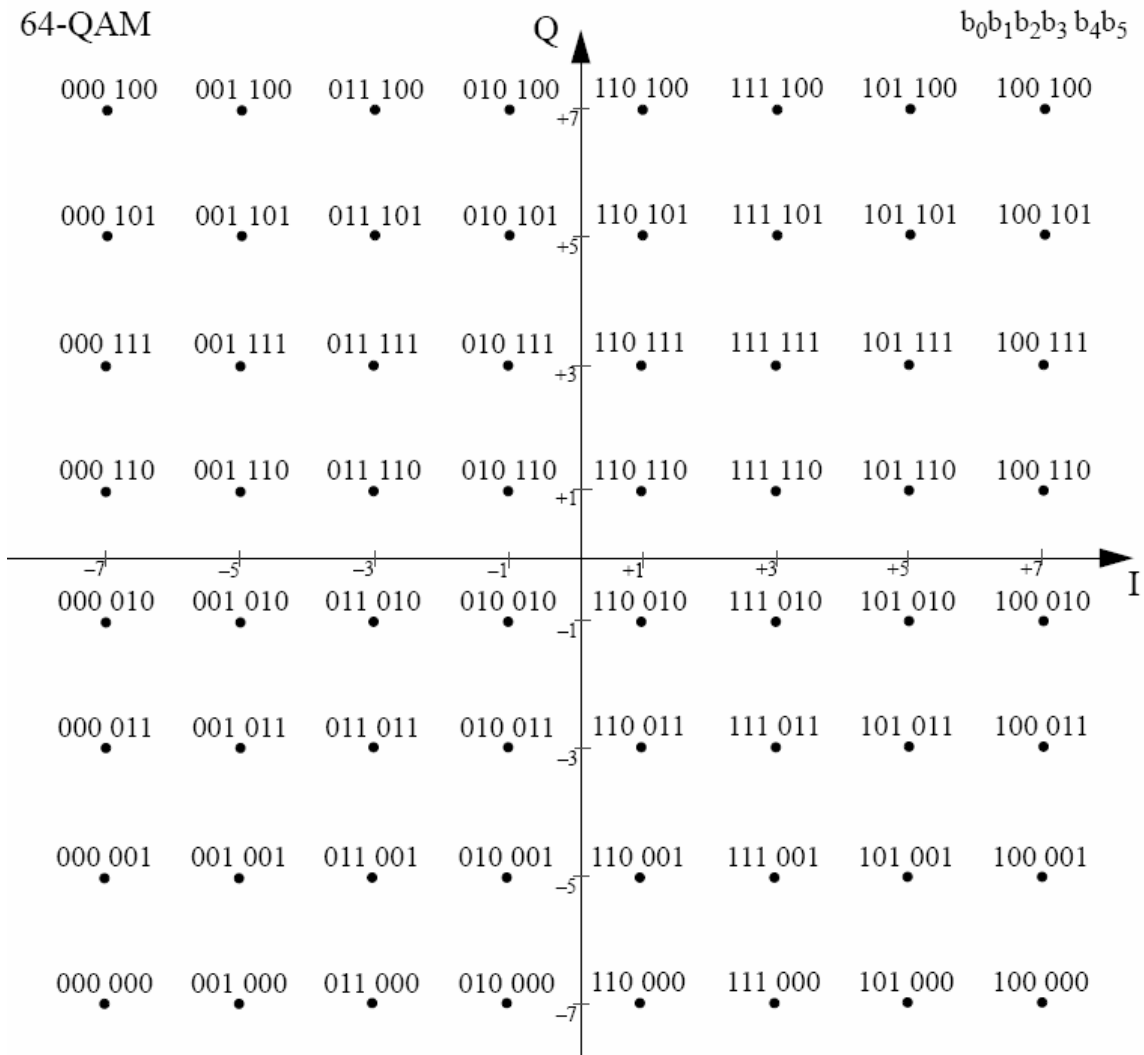
| Темп передачи, Мбит/сек | Модуляция | Темп кодирования | Число бит данных на OFDM символ |
|-------------------------|-----------|------------------|---------------------------------|
| 6 | BPSK | 1/2 | 24 |
| 9 | BPSK | 3/4 | 36 |
| 12 | QPSK | 1/2 | 48 |
| 18 | QPSK | 3/4 | 72 |
| 24 | 16-QAM | 1/2 | 96 |
| 36 | 16-QAM | 3/4 | 144 |
| 48 | 64-QAM | 2/3 | 192 |
| 54 | 64-QAM | 3/4 | 216 |



$d = K_{MOD}(I + jQ)$ - преобразование бит в комплексное число

I и Q – реальная и мнимая квадратуры,
 K_{MOD} – нормирующий множитель,
 обеспечивающий одинаковую среднюю
 мощность для всех модуляций.

Модуляция данных (II)



Используемые диапазоны частот (channelization)

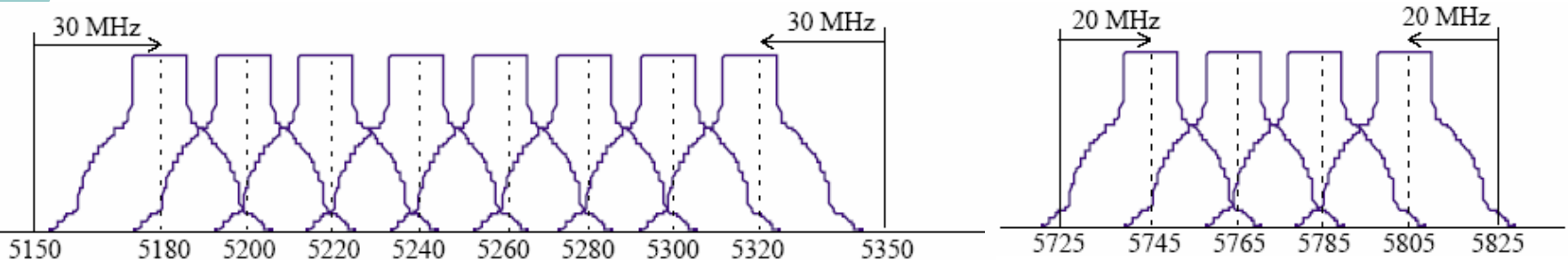
Используется технология мультиплексирования с разделением по ортогональным частотам (OFDM) в диапазоне 5 ГГц в безлицензионных диапазонах национальной информационной инфраструктуры США U-NII (unlicensed national information infrastructure) **5,15÷5,25 ГГц**, **5,25÷5,35 ГГц** и **5,725÷5,825 ГГц**. Используются каналы шириной **20 МГц** по четыре канала в каждом из трех диапазонов.

$$f_{oi} = 5000 + 5 \times i \quad (i = 0, 2, \dots, 200) \quad - \text{центральные частоты (МГц)}$$

$i=36, 40, 44, 48$ - первый поддиапазон. Центральные частоты - 5180, 5200, 5220, 5240 МГц

$i=52, 56, 60, 64$ - второй поддиапазон. Центральные частоты - 5260, 5280, 5300, 5320 МГц

$i=149, 153, 157, 161$ - третий поддиапазон. Центральные частоты - 5745, 5765, 5785, 5805 МГц

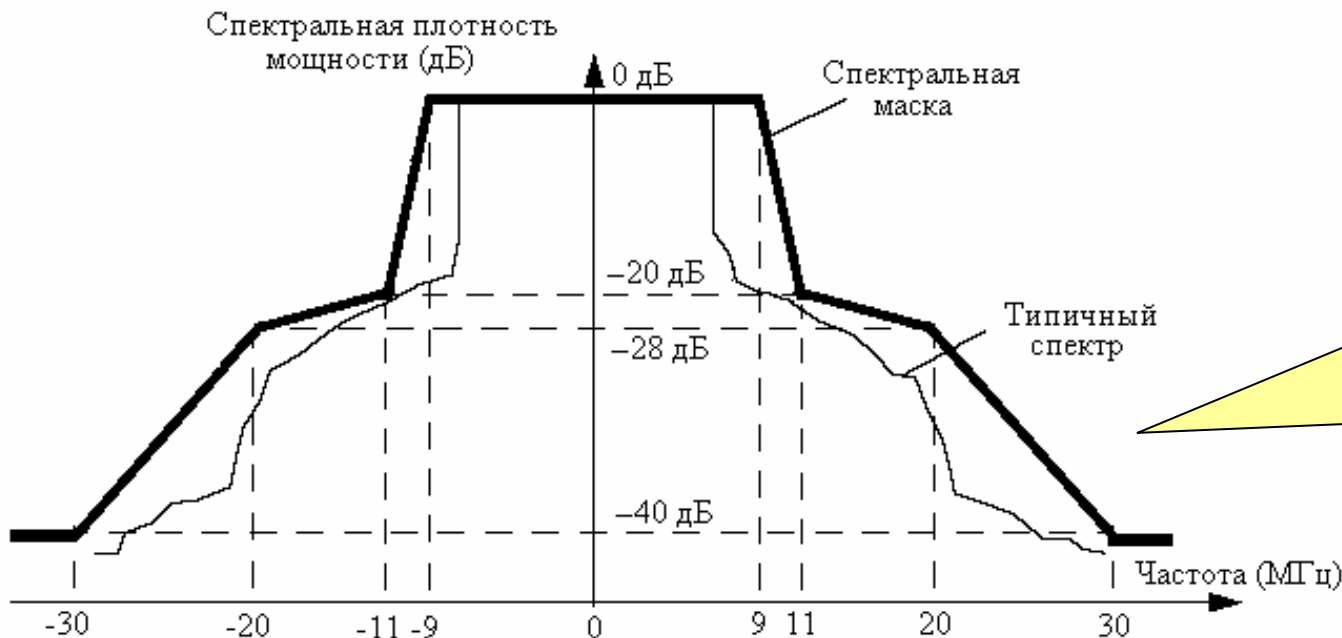


Распределение частотных каналов

Уровни мощности передатчика. Спектр излучаемого сигнала (спектральная маска).

Максимальный уровень излучаемой мощности 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, при условии, что усиление антенны не превышает 6 дБ.

Спектр может быть прямоугольным в диапазоне шириной до 18 МГц, ширина спектра не превышает 22 МГц, 40 МГц и 60 МГц по уровню -20 дБ, -28 дБ и -40 дБ, соответственно.



Спектральная маска для передаваемого сигнала и пример спектра типичного сигнала



Вероятность пакетных ошибок. Чувствительность приемника

Вероятность пакетных (фреймовых) 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/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/мВт** для всех скоростей передачи данных.

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

Содержание.

1. Подуровни физических уровней стандарта 802.11.
2. Локальные сети со скачкообразной перестройкой частоты (технология FHSS)
3. Процедура определения состояния физического уровня в системах с FHSS.
4. Локальные сети с расширением спектра методом прямой последовательности (технология DSSS).
5. Процедура определения состояния физического уровня в системах с DSSS.
6. Модуляция в системах с DSSS.
7. Беспроводные локальные сети стандарта 802.11b.
8. Высокоскоростная (High Rate) технология расширения спектра методом прямой последовательности (HR-DSSS).
9. Модуляция комплементарных кодов и технология двоичного пакетного сверточного кодирования (PBCC).
10. Уровни мощности и спектр излучаемого сигнала (спектральная маска) стандарта 802.11b.



Подуровни физических уровней и технологии передачи данных стандартов 802.11

Физические уровни стандарта 802.11 имеют два подуровня:

Physical Layer Convergence Procedure (PLCP) – подуровень определения состояния физического уровня;

Physical Medium Dependent (PMD) - подуровень физического уровня, зависящий от среды передачи.

Две технологии передачи данных на физическом уровне:

- технология расширения спектра путем скачкообразной перестройки частоты (FHSS).
- технология широкополосной модуляции с расширением спектра методом прямой последовательности (DSSS).

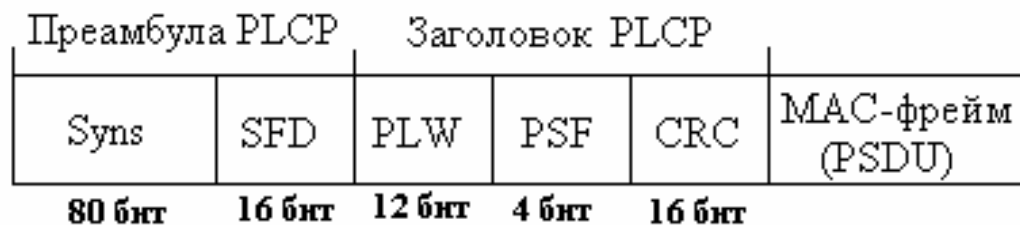
Обе технологии работают в диапазоне 2,4 ГГц, в котором выделена спектральная полоса шириной 82 МГц.



Локальные сети со скачкообразной перестройкой частоты (технология FHSS)

1. Скорости передачи данных 1 и 2 Мбит/с.
2. Полоса частот от 2,402 до 2,480 ГГц.
3. 79 неперекрывающихся каналов шириной 1 МГц каждый.
4. Параметры системы перестройки частоты:
 - частота перескоков не менее 2,5 раз в секунду как минимум между 6-ю (6 МГц) каналами.
 - перескоки разбиты на три набора по 26 частот каждый для минимизации числа коллизий между перекрывающимися зонами покрытия:
 - первый набор состоит из 0, 3, 6, 9, ..., 75 частот,
 - второй набор – из 1, 4, 7, 10, ..., 76 частот,
 - третий набор – из 2, 5, 8, 11, ..., 77 частот.
5. Модуляция - основана на гауссовом переключении частот (Gaussian frequency shift keying, GFSK). Сигнал, поступающий на частотный модулятор, фильтруется для сглаживания переходов с одной частоты на другую в гауссовском фильтре.
 - Скорость 1 Мбит/с – двоичная модуляция 2GFSK. Один бит модулирует сигнал. Девиация частоты составляет не менее 110 кГц.
 - Скорость 2 Мбит/с - четверичная модуляция 4GFSK. Два бита модулируют сигнал с использованием двух девиаций частоты. Первая девиация частоты, примерно в 3 раза больше, чем вторая.

Процедура определения состояния физического уровня в системах с FHSS



Формат фрейма FHSS подуровня PLCP.

Преамбула фрейма PLCP состоит из двух подполей.

- подполе Synс состоит из чередующихся 0 и 1 и начинается с 0. Приемная станция использует это поле, чтобы откорректировать уход частоты и синхронизировать распределение пакетов.
- подполе флага начала фрейма (SFD) состоит из строки 0000 1100 1011 1101, (крайний слева бит первый) и обеспечивает синхронизацию фреймов для приемной станции.

Заголовок фрейма PLCP состоит из трех подполей.

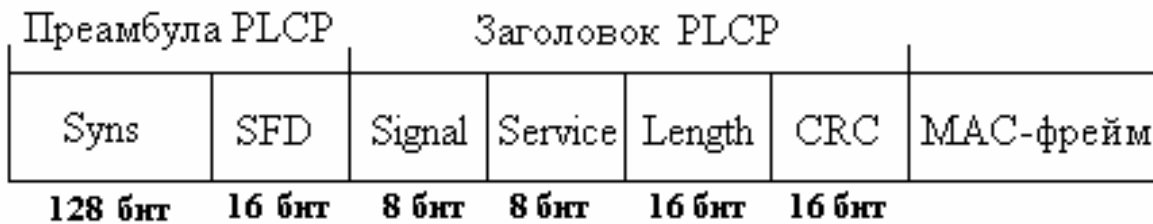
- слово длины служебного элемента данных PLCP – PLW – указывает размер фрейма MAC (PSDU) в октетах.
- сигнальное поле PSF указывает скорость передачи данных фрейма.
- подполе CRC (циклический избыточный код) обеспечивает оценку правильности переданного фрейма.



Локальные сети с расширением спектра методом прямой последовательности (технология DSSS)

1. Скорости передачи данных 1 и 2 Мбит/с.
2. Полоса частот от 2,4 - 2,483 ГГц.
3. 3 неперекрывающихся канала шириной 22 МГц каждый.
4. Подуровень PLCP (определения состояния физического уровня) 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.
4. Скремблированная преамбула PLCP передается со скоростью 1 Мбит/с, а скремблированный фрейм MPDU - со скоростью, указанной в подполе Signal.
5. Модуляция:
 - 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.

Процедура определения состояния физического уровня в системах с DSSS



Формат фрейма DSSS подуровня PLCP.

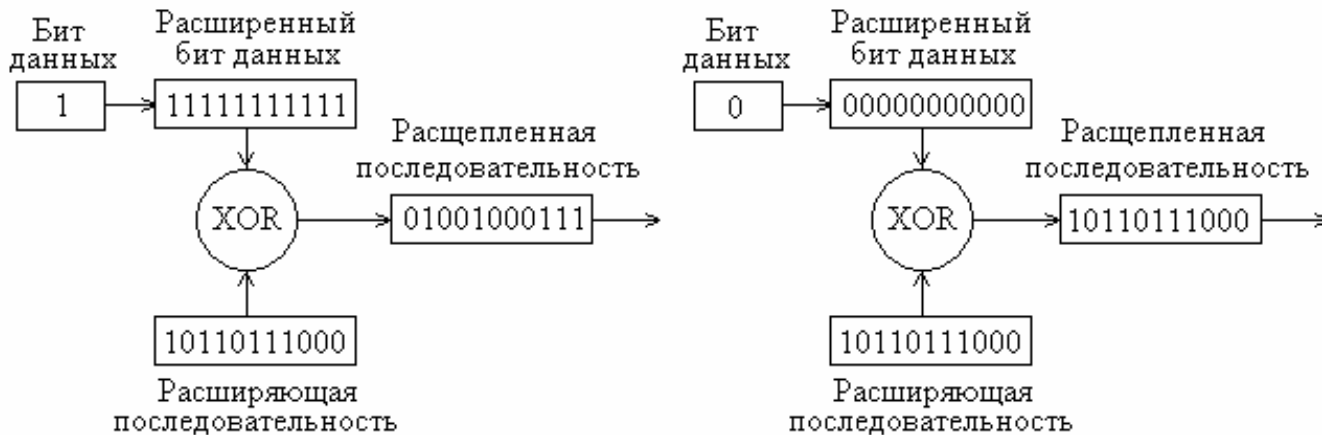
Преамбула фрейма PLCP состоит из двух подполей.

- подполе Synс состоит из чередующихся 0 и 1 и начинается с 0. Приемная станция использует это поле, чтобы синхронизировать распределение пакетов.
- подполе флага начала фрейма (SFD) обеспечивает синхронизацию фреймов для приемной станции.

Заголовок фрейма PLCP состоит из четырех подполей.

- подполе Signal - указывает тип модуляции и скорость передачи.
- подполе Service - зарезервировано для будущих модификаций стандарта.
- подполе Length - указывает количество микросекунд (из диапазона $16 \div 2^{16} - 1$), необходимое для передачи части MAC фрейма.
- подполе CRC (циклический избыточный код) - обеспечивает оценку правильности переданного фрейма.

Модуляция в системах с DSSS



Расширение битов данных для 1 и 0

Каждый бит заменяется кодом Баркера длиной 11 для расширения полосы частот. Двоичная 1 расширяется до 1111111111, а 0 - до 0000000000. «Расширенные» биты подаются на схему «ИЛИ», либо «исключающее ИЛИ» (XOR) вместе с расширяющей последовательностью.

Получившиеся чипы преобразуются в символы и модулируются.

При скорости передачи 1 Мбит/с используется дифференциальная двоичная фазовая модуляция (DBPSK). При поступлении 0 фаза сохраняется, а при поступлении 1 фаза изменяется на 180 град.

При скорости 2 Мбит/с два чипа отображаются в символ. Используется относительная четверичная фазовая модуляция (DQPSK). Четверем вариантам входных данных (00, 01, 10 и 11) соответствует изменение фазы на 0, 90, 180 или 270 градусов.

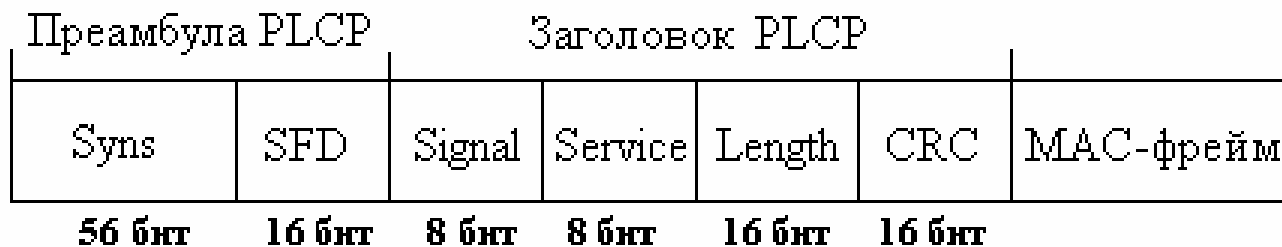


Беспроводные локальные сети стандарта 802.11b

Стандарт появился в 1999 г. и определяет высокоскоростную (High Rate) технологию расширения спектра методом прямой последовательности (HR-DSSS).

1. Скорости передачи данных 5,5 и 11 Мбит/с.
2. Диапазон 2,4 ГГц.
3. 3 неперекрывающихся канала шириной 22 МГц каждый.
3. Два вида кодирования:
 - комплементарные коды (complementary code keying, ССК)
 - двоичное пакетное сверточное кодирование (packet binary convolutional coding, PBCC) (опционально).
4. Квадратурная фазовая манипуляция (quadrature phase shift key, QPSK) при использовании комплементарных кодов

Процедура определения состояния физического уровня (PLCP) технологии HR-DSSS

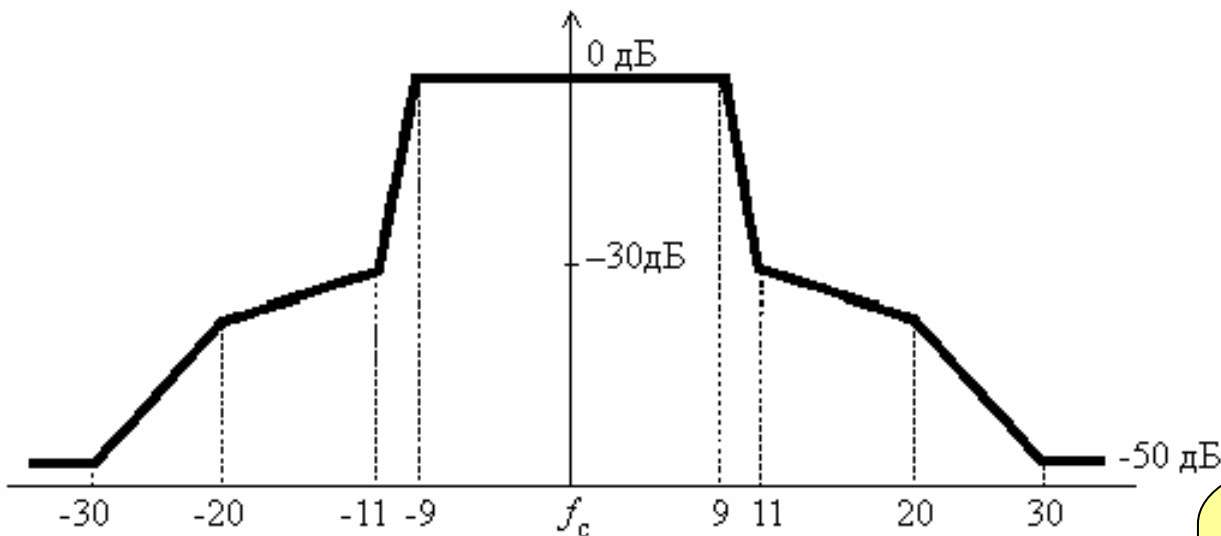


Короткий PPDU фрейм технологии HR-DSSS

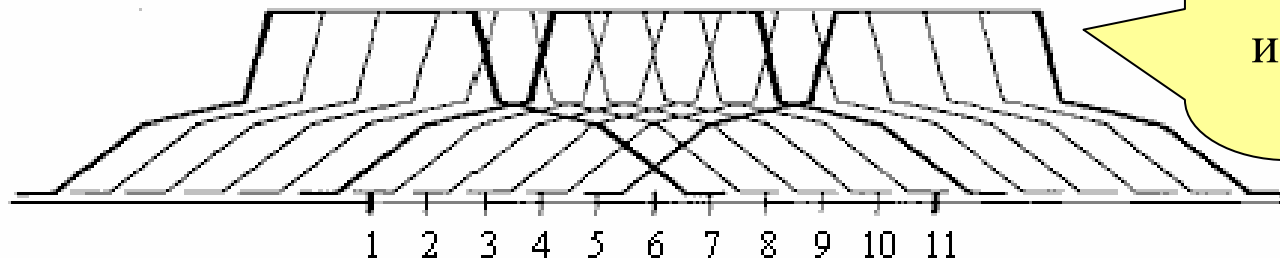
Используются **длинный и короткий** фреймы PPDU. Преамбула и заголовки длинного фрейма передаются со скоростью 1 Мбит/с для обеспечения совместимости с обычной технологией DSSS. Длинный фрейм немного изменен для обеспечения повышенной скорости передачи данных (в подполе Signal можно указать новые скорости передачи данных (5.5 и 11 Мбит/с), в подполе Service определены ранее зарезервированные биты). Короткий фрейм минимизирует число служебных сигналов, необходимых для связи передатчика с приемником. Заголовок PLCP передается на скорости 2 Мбит/с, в то время как данные передаются со скоростью 2, 5.5 или 11 Мбит/с.

Уровни мощности передатчика. Спектр излучаемого сигнала (спектральная маска).

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



Спектральная маска стандарта 802.11b



Неперекрывающиеся каналы. Из 11 каналов только три из них (1, 6 и 11) не перекрывают друг друга.

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

Содержание.

1. Схемы модуляции стандарта 802.11g.
2. Скорости передачи данных в стандарте 802.11g
3. Подуровень процедуры определения состояния физического уровня (PLCP)
4. Процедура оценки занятости канала (CCA – clear channel assessment).
5. Основные параметры физического уровня стандартов 802.11.
6. Особенности локальных сетей стандарта 802.11n.



Схемы модуляции стандарта 802.11g

Стандарт IEEE 802.11g (2003 год) определяет технологию физического уровня с увеличенной скоростью передачи (ERP - extended rate PHY) до 54 Мбит/с в диапазоне 2,4 ГГц.

Стандарт основан на методе OFDM, используемом в стандарте 802.11a. Стандарт 802.11g обеспечивает совместимость со стандартом 802.11b в отличие от стандарта 802.11a.

В стандарте 802.11g используются три схемы модуляции:

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



Скорости передачи данных в стандарте 802.11g

При ERP-OFDM модуляции обеспечивается скорость передачи данных **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 позволяет (опционально) использовать двоичное сверточное кодирование (packet binary convolutional coding – PBCC) со скоростями **22 и 33 Мбит/с**, и (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.**

Подуровень процедуры определения состояния физического уровня (PLCP)

Пять процедур PLCP:

- с длинной преамбулой;
- с короткой преамбулой;
- с преамбулой ERP-OFDM;
- длинной преамбулой DSSS-OFDM;
- короткой преамбулой DSSS-OFDM.

Первые три - обязательны, последние - опциональны.

| 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 |

Процедура оценки незанятости канала (ССА – clear channel assessment)

Различные стандарты семейства 802.11 используют один из **пяти** режимов ССА.

- Решение о незанятости основывается на выявлении в канале мощности, превосходящей некоторое пороговое значение.
- Решение о незанятости основывается на обнаружении сигнала несущей, соответствующей стандарту 802.11.
- Обнаружение несущей и выявление мощности (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 мощности, соответствующей повышенным скоростям передачи на физическом уровне, и обнаружение несущей по способу 3, но применительно к ERP.

Основные параметры физического уровня стандартов 802.11. Особенности локальных сетей стандарта 802.11n.

| Параметр | Физический уровень стандартов 802.11 | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|-------------|-----------------|--------------|--------------|
| | 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, Мбит/с | 2 | 2 | 11 | 54 | 54 |
| Тип модуляции | QPSK | GFSK | CCK | OFDM | OFDM |

Стандарт 802.11n должен обеспечить :

реальную скорость передачи данных более **100 Мбит/с**.

Совместимость с 802.11 а за счет использования OFDM (ортогонального частотного мультиплексирования) и QAM (квадратурной амплитудной модуляции).

Два способа увеличения скорости передачи в стандарте 802.11n :

- использование нескольких антенн для передачи и приёма (MIMO - multiple input multiple output – технология)
- расширение частотного диапазона каждого канала с 20 МГц до 40 МГц.