

3GPP Long Term Evolution (LTE)

Обзор физического уровня.
Октябрь, 2014

Содержание

- I. Введение
- II. Физический уровень в структуре протоколов LTE
- III. Ключевые элементы и технологии физического уровня LTE
- IV. Передача сигналов от базовой станции к пользователю (Downlink, DL)
- V. Передача сигналов от пользователя к базовой станции (Uplink, UL)

I. Введение

Эволюция систем сотовой связи (1/2)

- **1G (Начало 1980-х)**

- Передача голоса: аналоговая модуляция
- Передача данных: отсутствует
- Способ множественного доступа: FDMA
- Пример: AMPS

- **2G (Начало 1990-х)**

- Передача голоса: цифровая модуляция, схема с коммутацией каналов
- Передача данных: схема с коммутацией каналов
- Способ множественного доступа: TDMA и узкополосная CDMA
- Пример: GSM, IS-95

Эволюция систем сотовой связи (2/2)

- **3G (Конец 1990-х)**
 - Передача голоса: цифровая модуляция, схема с коммутацией каналов
 - Передача данных: схема с коммутацией пакетов
 - Способ множественного доступа: широкополосная CDMA
 - Пример: UMTS, CDMA2000
- **4G (Конец 2010-х)**
 - Передача голоса: цифровая модуляция, схема с коммутацией пакетов
 - Передача данных: схема с коммутацией пакетов
 - Способ множественного доступа: OFDMA
 - Пример: LTE-Advanced (Rel-10), IEEE 802.16m

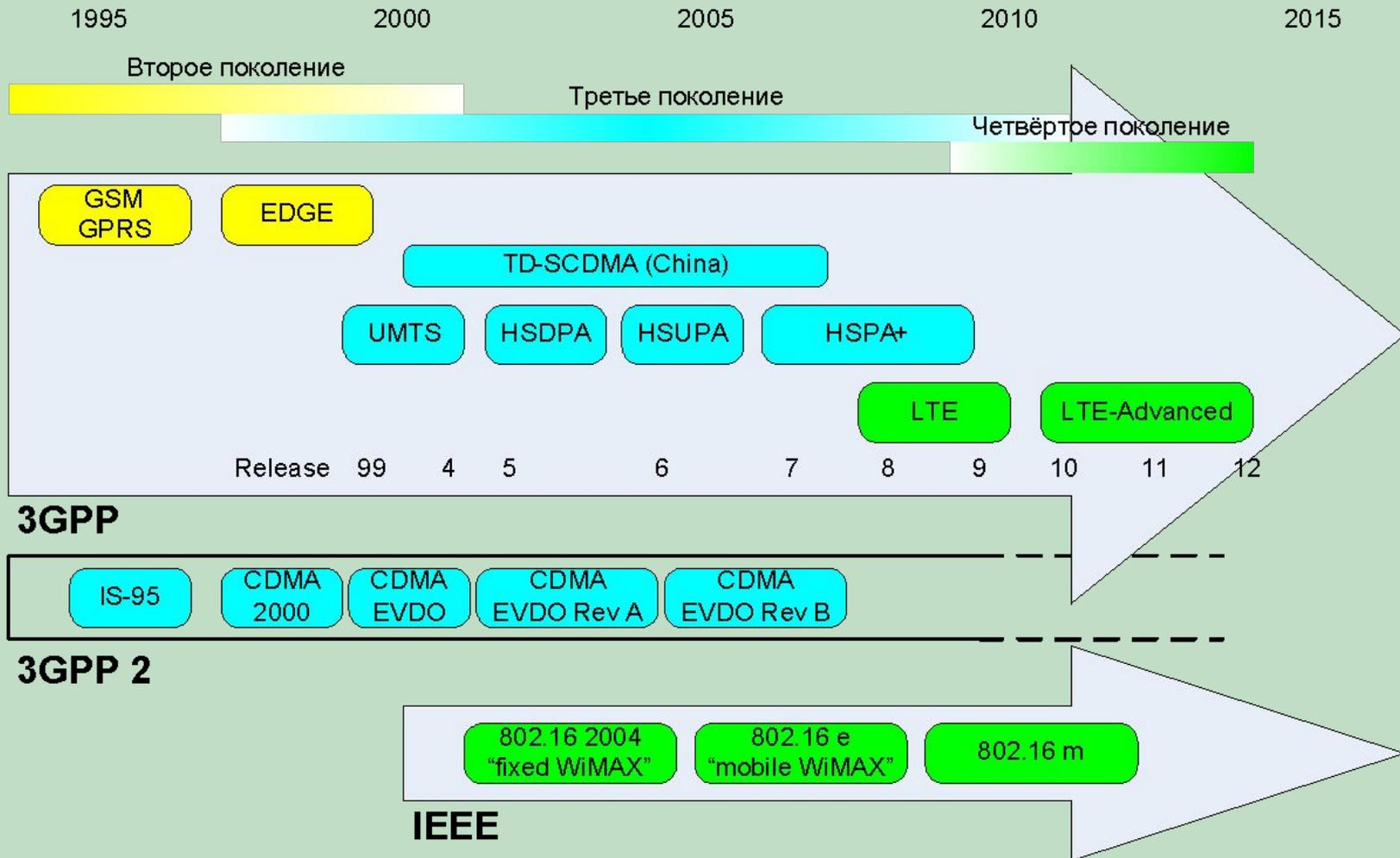
Формальные требования к 3G и 4G

- **ITU** (International Telecommunication Union) является глобальным регулятором
 - Действует под эгидой ООН
 - Включает в себя представителей 191 государства
- Инициатива **IMT-2000** (International Mobile Telecommunications 2000) определяет требования к системам поколения 3G
 - Возможность одновременной передачи голоса и данных
 - Скорость передачи данных: 144 кбит/с для подвижных пользователей, 384 кбит/с для пешеходов и 2 Мбит/с для неподвижных пользователей
- Инициатива **IMT-Advanced** определяет требования к системам поколения 4G
 - Схема с коммутацией пакетов используется для передачи данных и голоса
 - Скорость передачи данных не ниже 100 Мбит/с для подвижных пользователей и 1 Гбит/с для неподвижных пользователей
 - Гибкое использование полосы частот
 - Оптимальность с точки зрения мультимедийных приложений, таких как потоковое аудио и видео высокой четкости

Международная активность по выработке стандартов

- **3GPP** (3rd Generation Partnership Project)
 - Нацелен на развитие стандарта GSM
 - Коммерческое название **LTE** (Long Term Evolution)/**LTE-Advanced**
 - Основан в 1998 году организациями: European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Association of Radio Industries and Businesses/Telecommunication Technology Committee (ARIB/TTC) (Japan), China Communications Standards Association (CCSA), Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS) (North America) and Telecommunications Technology Association (TTA) (South Korea)
- **3GPP 2** (3rd Generation Partnership Project 2)
 - Нацелен на развитие стандарта IS-95
 - Коммерческое название UMB (Ultra Mobile Broadband)
 - Основан в 1998 году организациями: Association of Radio Industries and Businesses/Telecommunication Technology Committee (ARIB/TTC) (Japan), China Communications Standards Association (CCSA), Telecommunications Industry Association (TIA) (North America) and Telecommunications Technology Association (TTA) (South Korea)
- **IEEE-SA** (IEEE Standards Association)
 - Нацелен на развитие стандарта IEEE 802.16
 - Коммерческое название **WiMAX** (Worldwide Interoperability for Microwave Access)
 - WiMAX Forum основан в 2001 году и состоит из несколько сотен членом

Коммерческая доступность



Обозначения:

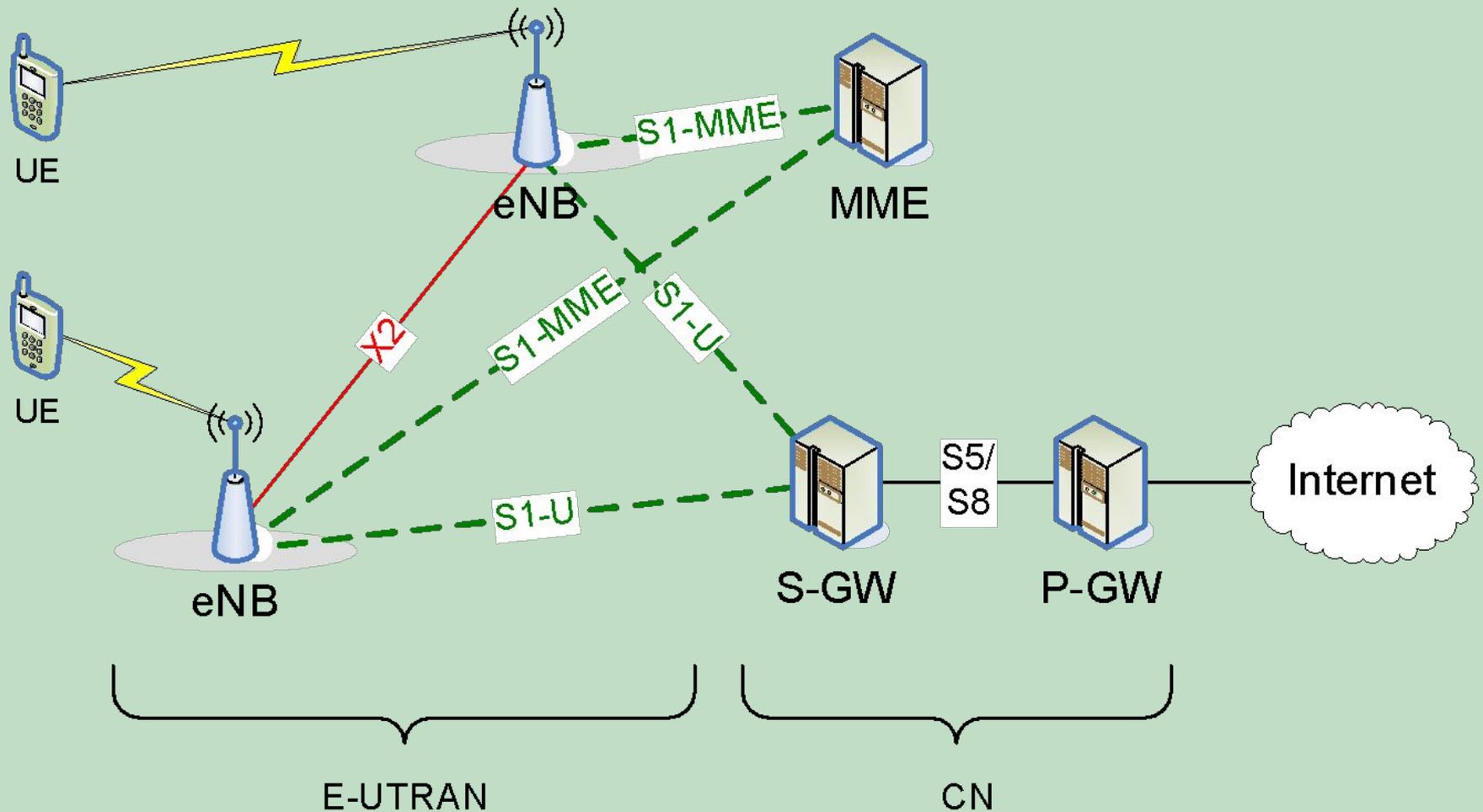
TDMA/
FDMA

CDMA

OFDMA

II. Физический уровень в структуре протоколов LTE

Архитектура сети (1/3)



Архитектура сети (2/3)

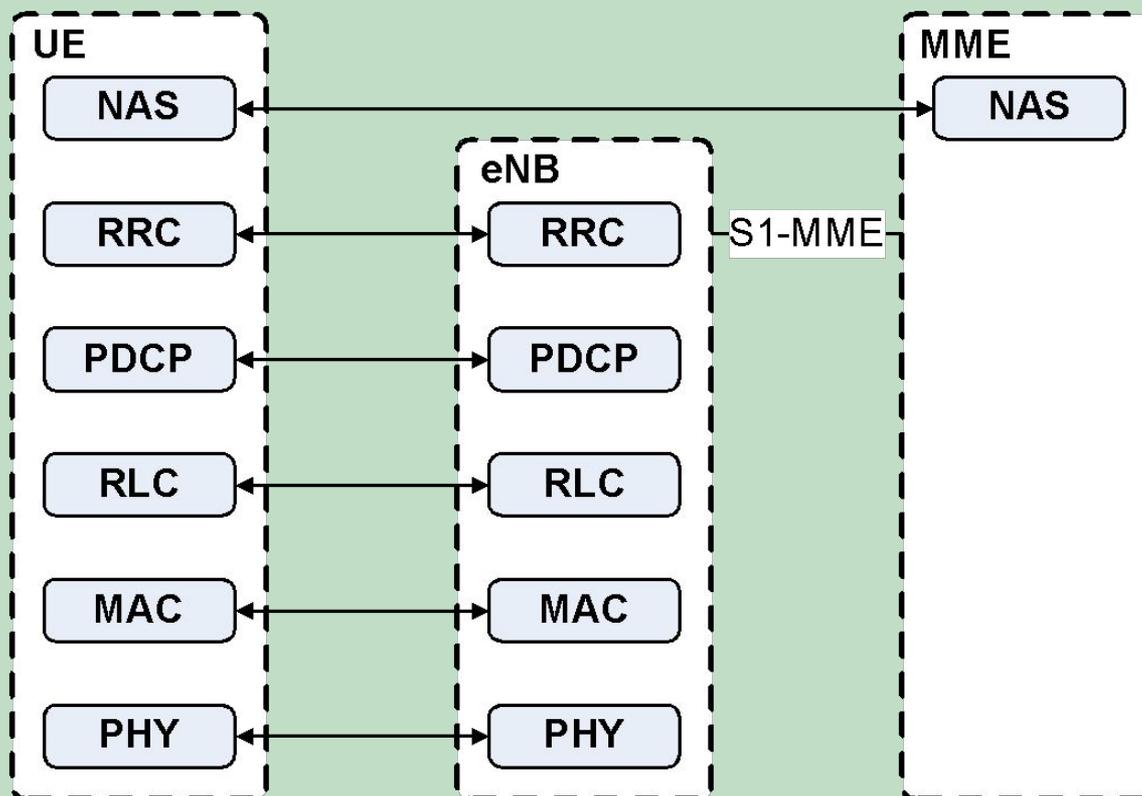
- **eNB** (evolved Node-B) - базовая станция сети радиодоступа E-UTRAN
 - Все функции радиointерфейса
 - Управление радиоканалами
 - Управление мобильностью
 - Динамическое распределение физических ресурсов между пользователями
 - И др.
- **MME** (Mobile Management Entity)
 - Установление соединения между пользователем (UE – User Equipment) и базовой сетью (CN – Core Network)
 - Создает и локально сохраняет пользовательский контекст (информацию об абоненте)
 - Аутентификация абонентов, управление ключами шифрования
 - И др.

Архитектура сети (2/3)

- **S-GW** (Serving Gateway)
 - Коммутация пакетов данных при обеспечении мобильности пользователя
 - Маршрутизация и пересылка пакетов данных
 - Законный перехват пакетов данных
 - И др.
- **P-GW** (Packed data network Gateway)
 - Назначение абоненту IP адреса
 - Фильтрация пакетов
 - И др.

Архитектура протоколов LTE (1/3)

- **PHY** – Physical layer
- **MAC** – Medium Access Control
- **RLC** – Radio Link Control
- **PDCP** – Packet Data Convergence Protocol
- **RRC** – Radio Resource Control
- **NAS** – Non-Access Stratum

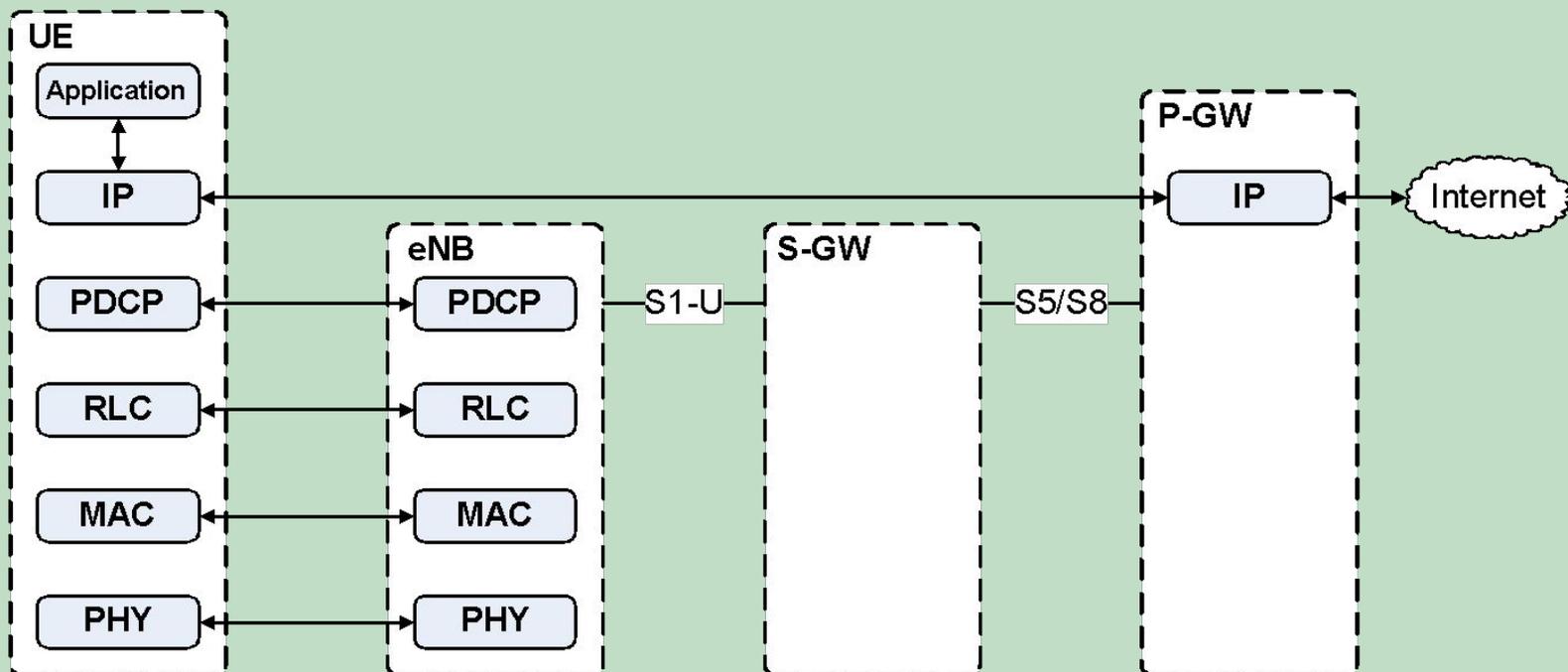


Стек протоколов
плоскости
управления
(Control-Plane)

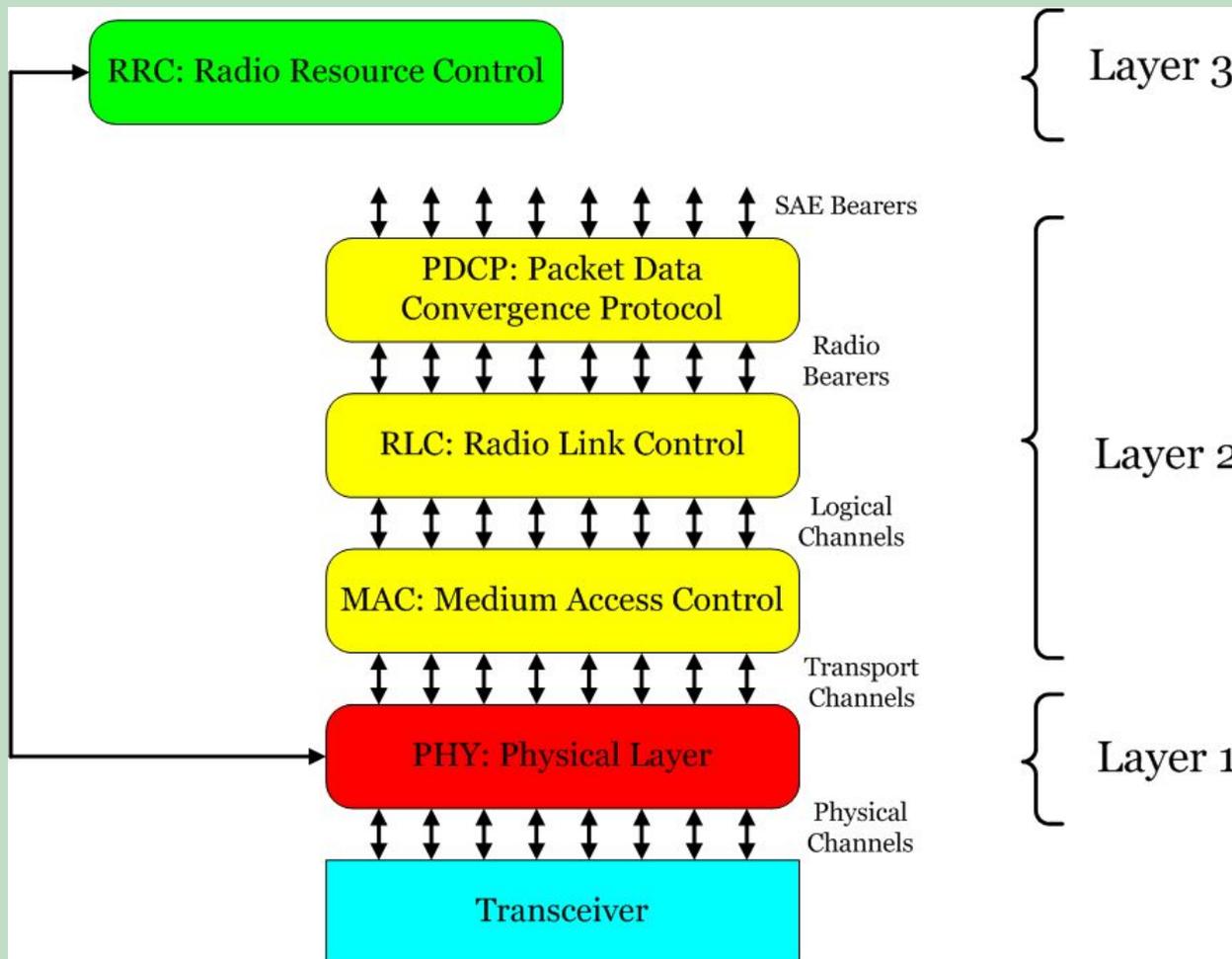
Архитектура протоколов LTE (2/3)

IP – Internet Protocol

Стек протоколов
плоскости
пользователя
(User-Plane)



Архитектура протоколов LTE (3/3)



Функциональное назначение протоколов (Layer 3)

- **RRC**

- Широковещательная трансляция служебной информации
- Все процедуры, связанные с установлением и разрывом соединения в т.ч. начальная активация функции шифрования, вызов абонента, конфигурация всех протоколов Layer 2, Layer 1
- Хэндовер
- Конфигурация измерений необходимых физических параметров (напр., уровень принимаемой мощности) и сообщение результатов этих измерений
- И др.

Функциональное назначение протоколов (Layer 2)

- **PDCP**
 - Сжатие заголовков
 - Шифрование/дешифрование
 - Контроль целостности при хэндовере
- **RLC**
 - Сегментация и компоновка пакетов
 - Повторная передача пакетов
 - Переупорядочивание пакетов
- **MAC**
 - Мультиплексирование логических каналов
 - Распределение физических ресурсов (**Scheduling**)
 - Поддержка HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest)
 - Поддержка процедуры случайного доступа
 - Поддержка прерывающегося приёма (DRX)
 - И др.

Функциональное назначение протоколов (Layer 1)

- **PHY**

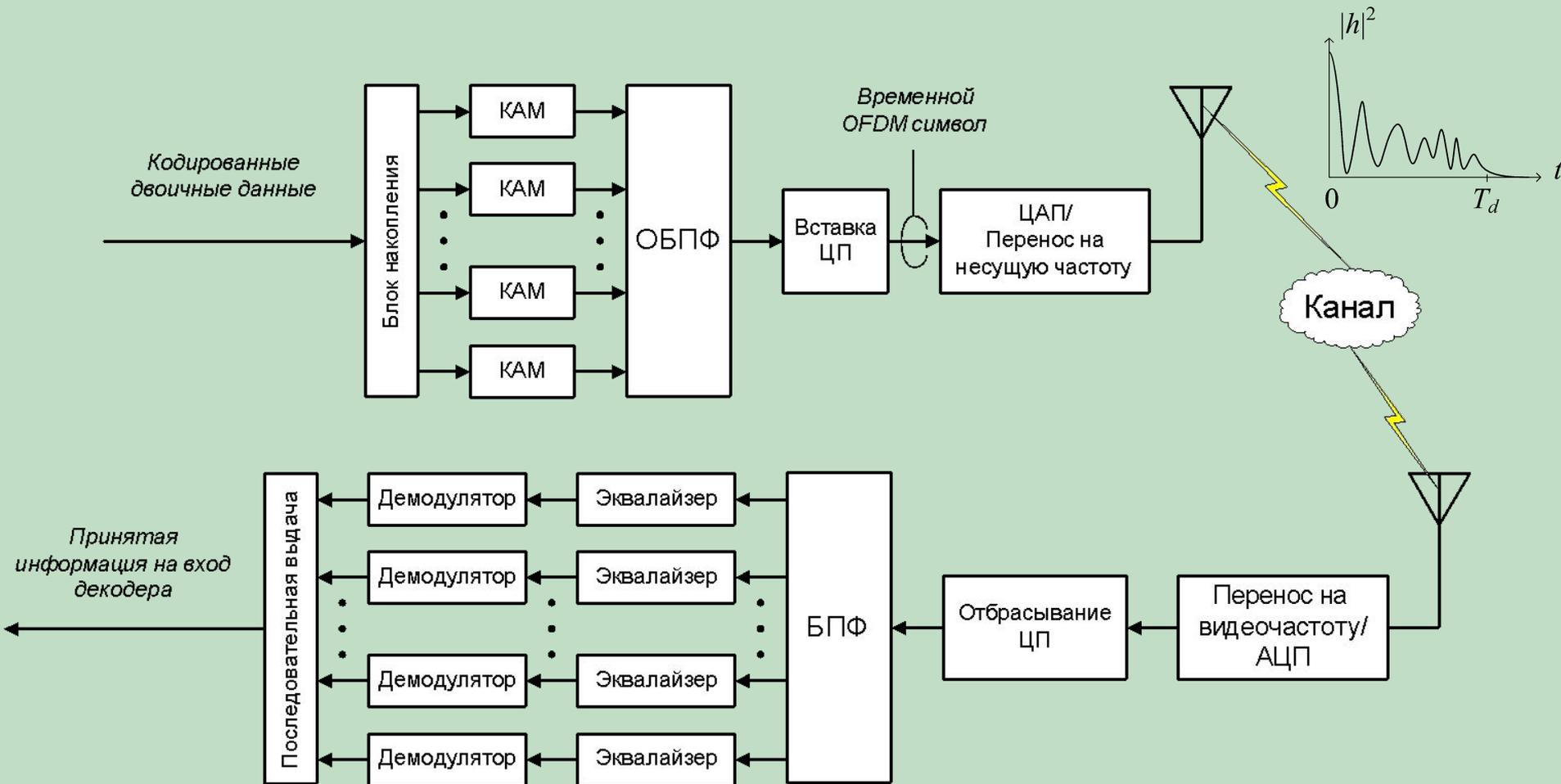
- Обнаружение ошибок транспортных каналов
- Кодирование/ декодирование транспортных каналов
- Согласование скоростей передачи и отображение транспортных каналов в физические каналы
- Модуляция/демодуляция физических каналов
- Частотная и временная синхронизация
- Измерение радиочастотных параметров
- Реализация пространственной обработки (spatial multiplexing, beam forming, spatial diversity)
- Обработка/формирование радиосигналов

III. Ключевые элементы и технологии физического уровня LTE

Ключевые технологии LTE/LTE-Advanced

- Множественный доступ на основе ортогонального частотного мультиплексирования (**OFDM**)
 - **OFDMA** для нисходящей передачи от базовой станции к абоненту (Downlink)
 - **SC-FDMA** для восходящей передачи от абонента к базовой станции (Uplink)
- **MIMO** – Multiple Input Multiple Output
 - Множественные антенные решётки для передачи и приёма сигналов: пространственный ресурс в дополнение к частотно-временному ресурсу
- **TDD/FDD**
 - Возможность развертывания сети при наличии разнообразных ограничений на используемый частотный диапазон и сосуществование с другими системами
- Carrier aggregation (LTE-A)
 - объединение нескольких частотных диапазонов
- Поддержка неоднородных сотовых сетей с различными типами базовых станций (малых сот), LTE-A

OFDM система связи с одной антенной



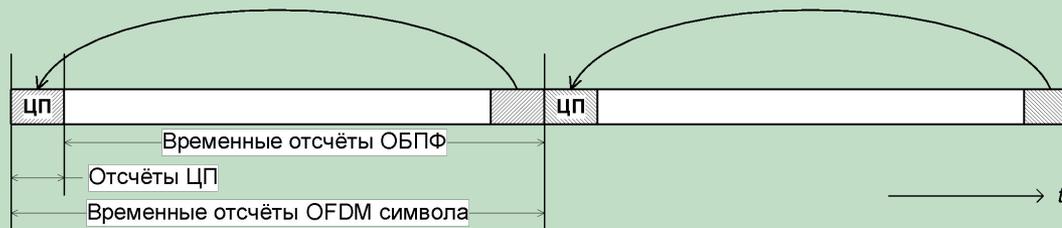
Математическое описание OFDM

Комплексный символ КАМ Дискретная частота (поднесущая) Несущая частота

$$x(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} s_n \exp\{j \cdot 2\pi \cdot n\Delta f \cdot t\} \exp\{j \cdot 2\pi \cdot f_c \cdot t\}$$

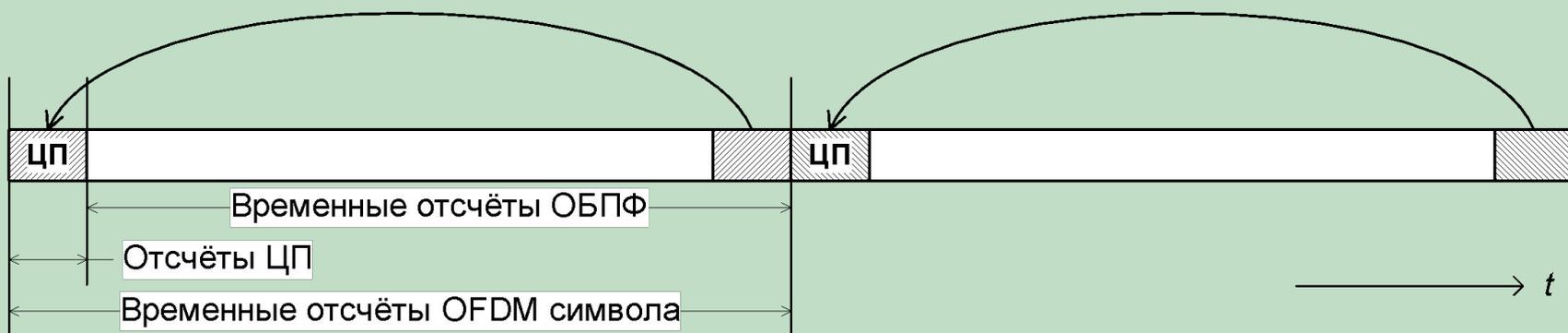
Непрерыв. по времени преобр. Фурье с дискретной частотой

Вставка циклического префикса (ЦП):



Окончательное формирование OFDM символа

Вставка циклического префикса (ЦП):



OFDM (1/2)

- В заданной полосе W формируется сетка поднесущих частот
 - Количество поднесущих N (размер БПФ), расстояние между ними равно $\Delta f = W/N$
 - Помехи между поднесущими отсутствуют (свойство ортогональности)
- Каждой поднесущей ставится в соответствие свой комплексный символ модуляции
 - Модулируются амплитуда и фаза поднесущих (КАМ – квадратурно-амплитудная модуляция)
- OFDM-символ является результатом Фурье-преобразования структуры, сформированной в частотной области
 - Символ имеет длительность $T_{\text{OFDM}} = 1/\Delta f$ – условие ортогональности поднесущих
 - Длительность OFDM-символа значительно превосходит длительность исходных символов: $T_{\text{OFDM}} = N \cdot T_{\text{КАМ}}$

OFDM (2/2)

- Технология OFDM эффективна в условиях частотно-селективного канала распространения
 - Значительная (по сравнению с длительностью исходных КАМ-символов) длительность OFDM-символа снижает вероятность появления межсимвольной помехи (ISI, Inter Symbol Interference)
 - Полное устранение межсимвольной помехи возможно за счет добавления защитных временных интервалов (ЦП - циклических префиксов) длительностью, превышающей возможные задержки при распространении сигналов в беспроводном канале (длину импульсной характеристики канала)
 - В пределах поднесущей канал является постоянным и поднесущие, соответствующие провалам в характеристике канала могут быть исключены из информационного обмена
- Практическая реализация OFDM имеет ряд особенностей
 - Ощутимая вычислительная сложность
 - Значительный пик-фактор OFDM-сигнала (PAPR – Peak to Average Power Ratio), т.е. высокие требования к динамическому диапазону передающего тракта
 - Чувствительность к нарушению ортогональности поднесущих (ошибки частотной синхронизации, доплеровское расширение спектра, нестационарность канала и пр.)

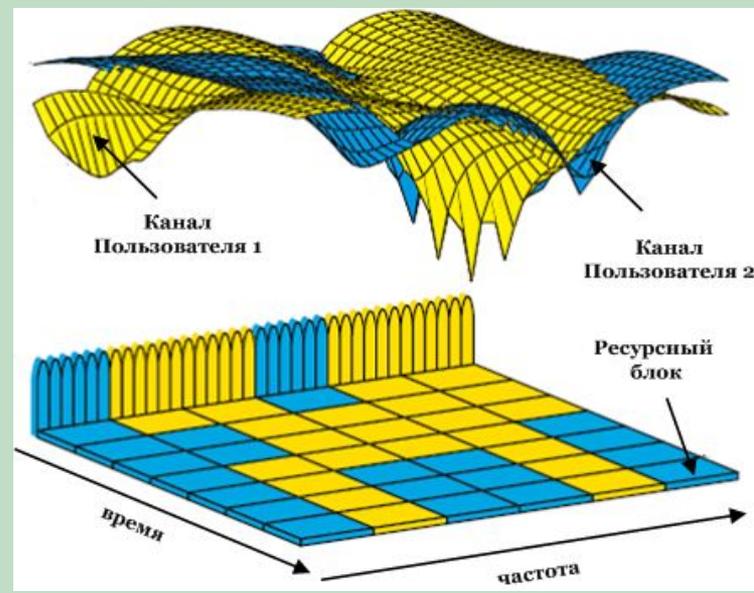
Длительность OFDM символа в LTE

- Длительность символа фиксирована
 - Длительность составляет $T_{\text{OFDM}} = 66.7$ мкс
 - Расстояние между поднесущими равно $\Delta f = 15$ кГц
 - Период дискретизации $T_S = T_{\text{OFDM}}/N$, где N соответствует размеру БПФ
- Защитный интервал реализован в виде циклического префикса (ЦП)
 - Длина префикса превосходит возможные задержки при распространении, то есть межсимвольная помеха не возникает
 - Циклическость префикса реализует механизм круговой свертки символа с импульсной характеристикой канала связи, что в частотной области эквивалентно поточечному произведению их дискретных спектров

Конфигурация	Длина префикса, мкс	Эквивалентная разность хода, км
Стандартный префикс	5.21 (первый символ)	1.55
	4.69 (последующие символы)	1.4
Расширенный префикс	16.67	5

OFDMA

- Технология OFDM позволяет оперировать частотным ресурсом на уровне узких полос (поднесущих)
 - При наличии обратной связи от приемника к передатчику можно выделить «плохие» и «хорошие» поднесущие; скорости передачи при использовании только «хороших» поднесущих повышается (выигрыш за счет выбора поднесущих)
 - При отсутствии обратной связи можно распределить данные равномерно между поднесущими, охватывая всю полосу частот; вероятность использования только «плохих» поднесущих снижается (выигрыш за счет частотного разнесения)
- Принцип OFDMA является логическим следствием свойств OFDM-сигнала
 - Сочетает в себе свойства TDMA и FDMA: полоса частот, доступная пользователю, меняется во времени в соответствии с потребностями или внешними условиями
 - Предполагает наличие развитых средств распределения частотно-временных ресурсов (Resource Scheduling)



SC-FDMA

- По сравнению с OFDM модуляцией, для уменьшения пик-фактора, вводится дополнительное прекодирование в частотной области
 - Прекодирование реализовано в виде дискретного преобразования Фурье (ДПФ), поэтому SC-FDMA известно так же как DFTS-OFDMA (Discrete Fourier Transform Spread OFDMA)
- В результате прекодирования один символ модуляции занимает группу поднесущих
 - Размер M дополнительного Фурье-преобразования значительно меньше размера основного Фурье-преобразования N
 - Отображение возможно на *смежные* или *разнесённые* поднесущие

Схема приёмника и передатчика SC-FDMA

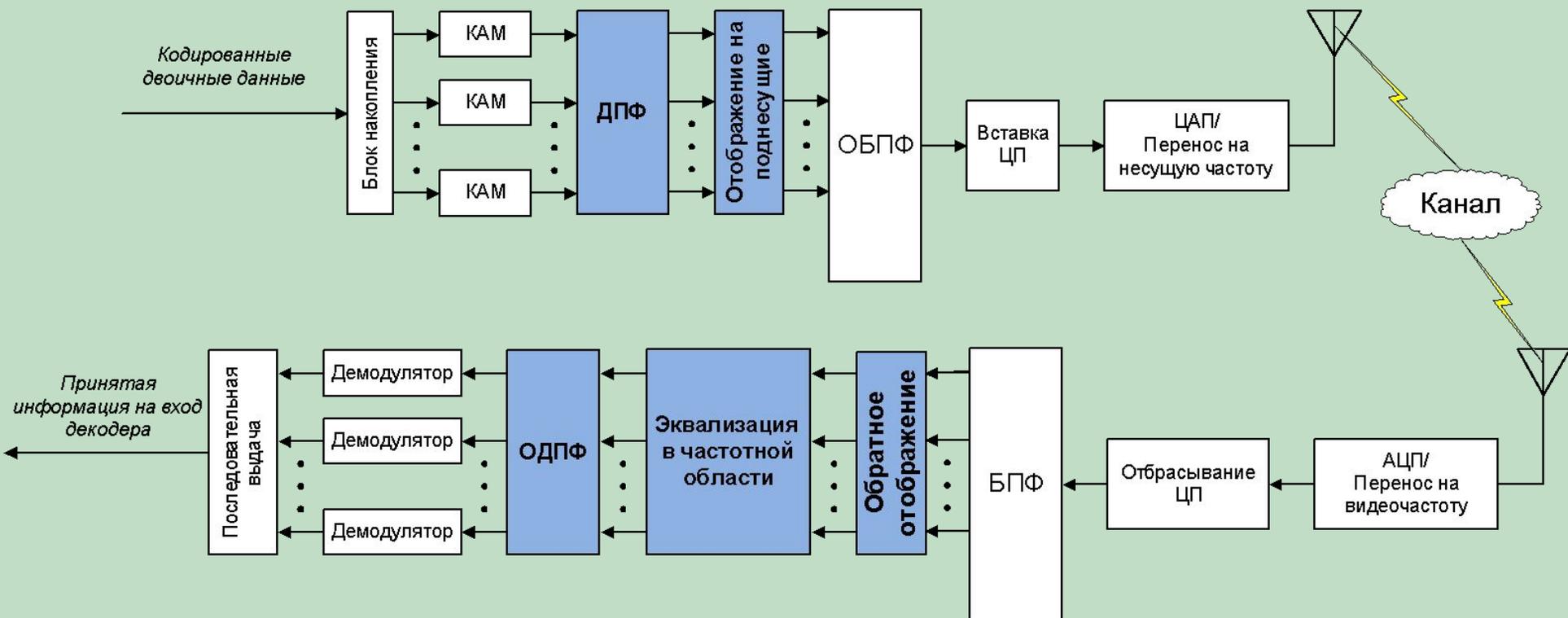
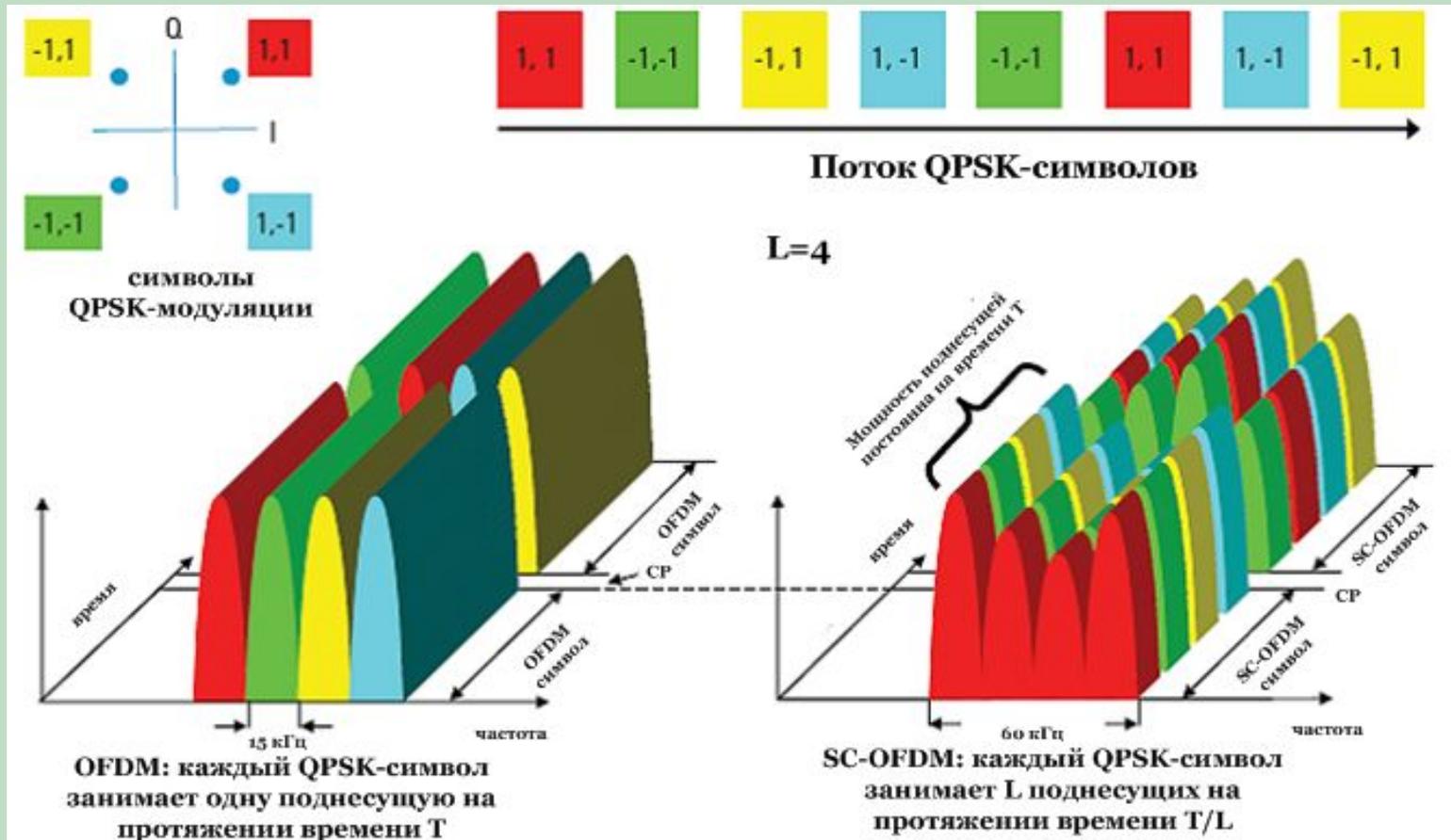


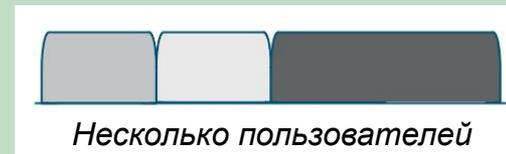
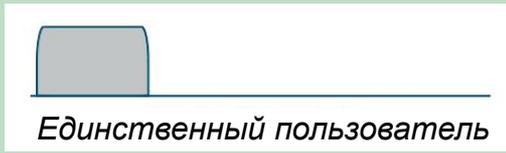
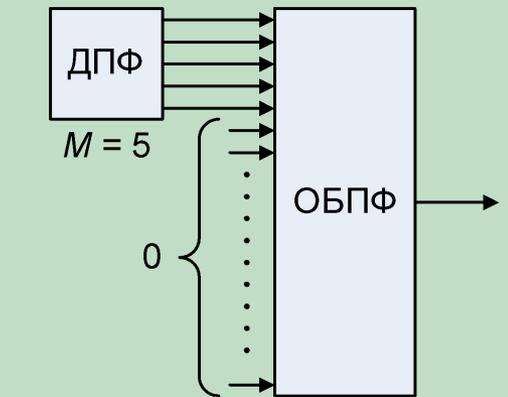
Иллюстрация схем цифровой модуляции OFDM и SC-FDMA



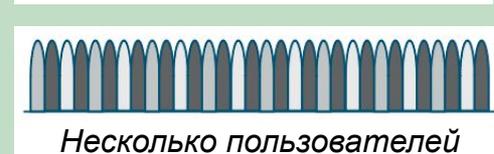
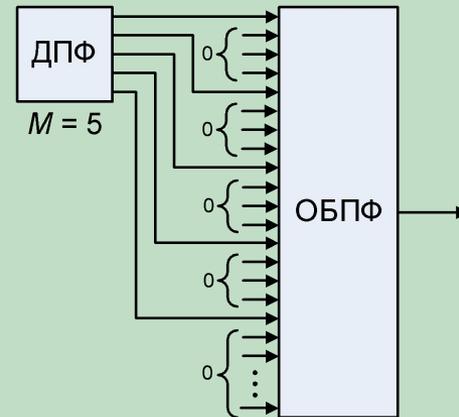
Отображение на поднесущие

- Два способа распределения M частотных выборок на N поднесущих
 - Локализованный (localized) – использование только части полосы
 - Распределённый (distributed or interleaved) – использование всей полосы для каждого пользователя

Локализованное отображение



Распределённое отображение



Распределённое отображение. Рассмотрение во временной обл.

- Имеется N комплексных частотных выборок некоторого пользователя, M из которых отличны от нуля, остальные $(N-M)$ равны нулю
- Отличные от нуля выборки перемежаются нулевыми выборками,
 $N = M * Q$

x_m - исходные выборки

X_k - исходные выборки в частотной области (после ДПФ)

\tilde{X}_l - выборки после отображения на поднесущие

\tilde{x}_n - отсчёты во временной области

Распределённое отображение. Рассмотрение во временной обл.

$$\tilde{X}_l = \begin{cases} X_{l/Q}, & l = Qk \quad (0 \leq k \leq M-1), \\ 0, & \text{другие } l. \end{cases}$$

$$n = Mq + m, \\ (0 \leq q \leq Q-1, \quad 0 \leq m \leq M-1)$$

$$\begin{aligned} \tilde{x}_n = \tilde{x}_{Mq+m} &= \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \tilde{X}_l \exp\left(j2\pi \frac{n}{N} l\right) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \tilde{X}_l \exp\left(j2\pi \frac{n}{MQ} Qk\right) = \\ &= \frac{1}{Q} \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X_k \exp\left(j2\pi \frac{n}{M} k\right) = \frac{1}{Q} \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X_k \exp\left(j2\pi \frac{Mq+m}{M} k\right) = \\ &= \frac{1}{Q} \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X_k \exp\left(j2\pi \frac{m}{M} k\right) = \frac{1}{Q} x_m \end{aligned}$$

Результирующие
временные выборки
пропорциональны
исходным выборкам

Локализованное отображение.

Рассмотрение во временной обл.

- Имеется N комплексных частотных выборок некоторого пользователя, M из которых отличны от нуля, остальные $(N-M)$ равны нулю
- Отличные от нуля выборки располагаются на соседних частотах,
 $N = M * Q$

$$\tilde{X}_l = \begin{cases} X_l, & (0 \leq l \leq M - 1) \\ 0, & (M \leq l \leq N - 1). \end{cases}$$

Локализованное отображение. Рассмотрение во временной обл.

$$\tilde{x}_n = \tilde{x}_{Qm+q} = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \tilde{X}_l \exp\left(j2\pi \frac{n}{N} l\right) = \frac{1}{Q} \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} X_l \exp\left(j2\pi \frac{Qm+q}{QM} l\right)$$

Два случая: $q = 0$; $q \neq 0$

$$\tilde{x}_n = \tilde{x}_{Qm} = \frac{1}{Q} x_m$$

$$n = Qm + q, \\ (0 \leq q \leq Q-1, \quad 0 \leq m \leq M-1)$$

$$X_l = \sum_{p=0}^{M-1} x_p \exp\left(-j2\pi \frac{p}{M} l\right)$$

$$\tilde{x}_n = \tilde{x}_{Qm+q} = \frac{1}{Q} \left[1 - \exp\left(j2\pi \frac{q}{Q}\right) \right] \frac{1}{M} \sum_{p=0}^{M-1} \frac{x_p}{1 - \exp\left[j2\pi \left(\frac{m-p}{M} + \frac{q}{QM}\right)\right]}$$

Только M из N результирующих временных отсчётов совпадают с исходными. Остальные являются *лин. комбинацией* исходных выборок

Иллюстрация во временной обл. различных типов отображений

$$\{x_m\} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline x(0) & x(1) & x(2) & x(3) \\ \hline \end{array}$$

Распределённое отображение на поднесущие

$$\{\tilde{x}_n\} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline x(0) & x(1) & x(2) & x(3) & x(0) & x(1) & x(2) & x(3) & x(0) & x(1) & x(2) & x(3) & x(0) & x(1) & x(2) & x(3) \\ \hline \end{array}$$

Локализованное отображение на поднесущие

$$\{\tilde{x}_n\} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline x(0) & * & * & * & x(1) & * & * & * & x(2) & * & * & * & x(3) & * & * & * \\ \hline \end{array}$$

- _____→ t
- Выборки во временной области ($M=4$, $N=16$)
 - Знак «*» означает линейную комбинацию

Пик-фактор (PAPR)

Тип модуляции	SC-FDMA		OFDM
	Распределенный способ	Локализованный способ	
QPSK	0 дБ	7.6 дБ	10.7 дБ
8-PSK	0 дБ	7.5 дБ	10.6 дБ
16-QAM	3.5 дБ	8.4 дБ	10.5 дБ
32-QAM	3.4 дБ	8.3 дБ	10.6 дБ
64-QAM	4.8 дБ	8.7 дБ	10.5 дБ

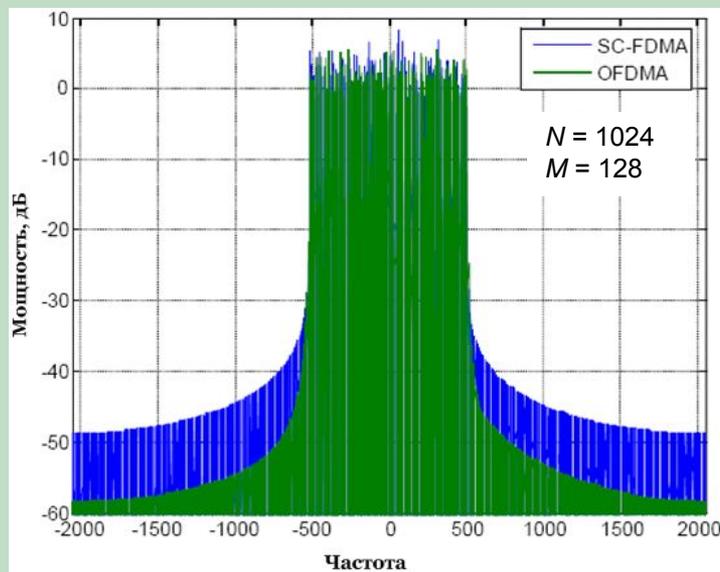
$$PAPR = \frac{\max_{n=0,1,\dots,N-1} |\tilde{x}_n|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |\tilde{x}_n|^2}$$

Значения PAPR, превышаемые с вероятностью 0.1% ($M=64$ и $N=256$)

- Распределенный способ - временные символы пропорциональны исходным символам
 - Модуляции с одинаковой мощностью сигналов – $PAPR = 1$ (0 дБ)
 - Модуляции с различной мощностью сигналов – $PAPR > 1$
- Локализованный способ – $PAPR > 1$ независимо от типа модуляции

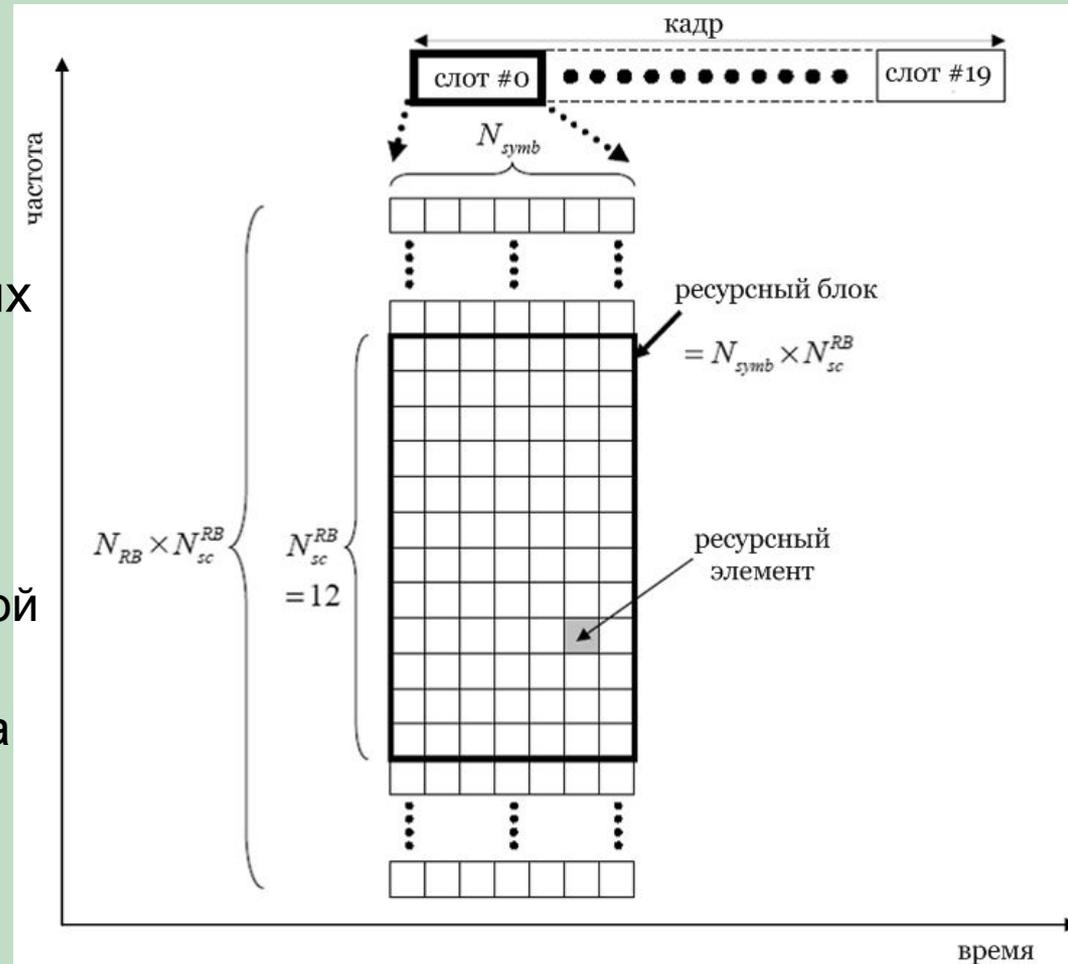
SC-FDMA в сравнении с OFDM

- Преимущества
 - Меньшие значения пик-фактора (снижение требований к передающему тракту)
 - Устойчивость к провалам в частотной характеристике канала
 - Меньшая чувствительность к рассогласованию по частоте
- Недостатки
 - Меньшая эффективность (в терминах BER или BLER)
 - Меньшая гибкость в использовании отдельных поднесущих
 - Более высокий уровень внеполосных излучений
 - Дополнительная вычислительная сложность



Ресурсная сетка LTE

- Частотно-временной ресурс между пользователями распределяется с использованием ресурсных блоков (Resource Block, RB)
 - Ресурсный блок охватывает 12 смежных поднесущих и 1 временной слот
 - Ширина ресурсного блока в частотной области 180 кГц (12 x 15 кГц)



Ресурс и полоса частот (1/2)

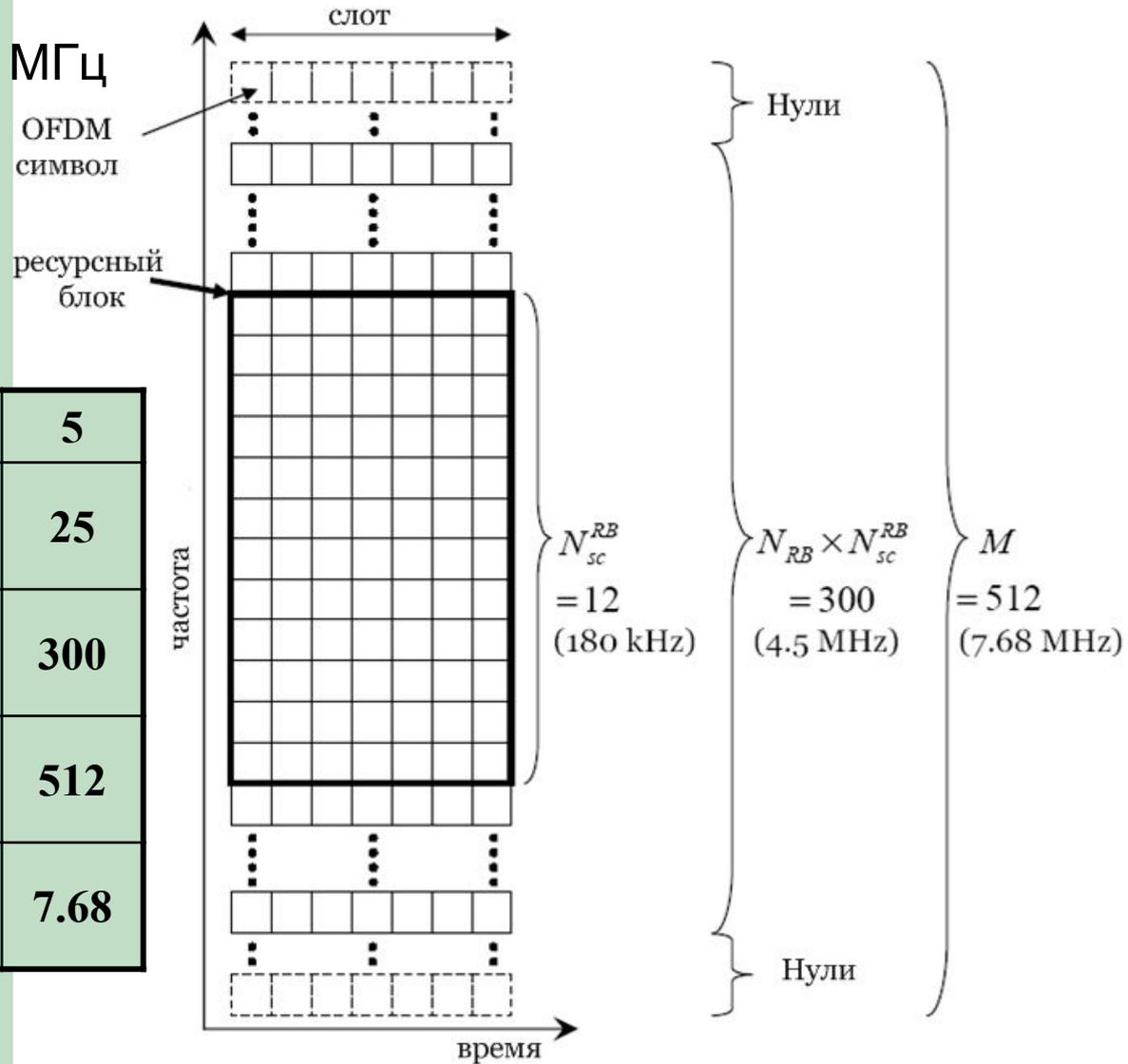
- Процедура распределение ресурсов не зависит от физической полосы частот
 - Распределение осуществляется в терминах ресурсных блоков
 - С расширением полосы частот количество ресурсных блоков возрастает

Полоса частот, МГц	1.4	3	5	10	15	20
Количество доступных ресурсных блоков	6	15	25	50	75	100
Количество используемых поднесущих	72	180	300	600	900	1200
Количество точек Фурье-преобразования	128	256	512	1024	1536	2048
Частота дискретизации, МГц	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72

Ресурс и полоса частот (2/2)

- Пример для полосы 5 МГц

Полоса частот, МГц	5
Количество доступных ресурсных блоков	25
Количество используемых поднесущих	300
Количество точек Фурье-преобразования	512
Частота дискретизации, МГц	7.68

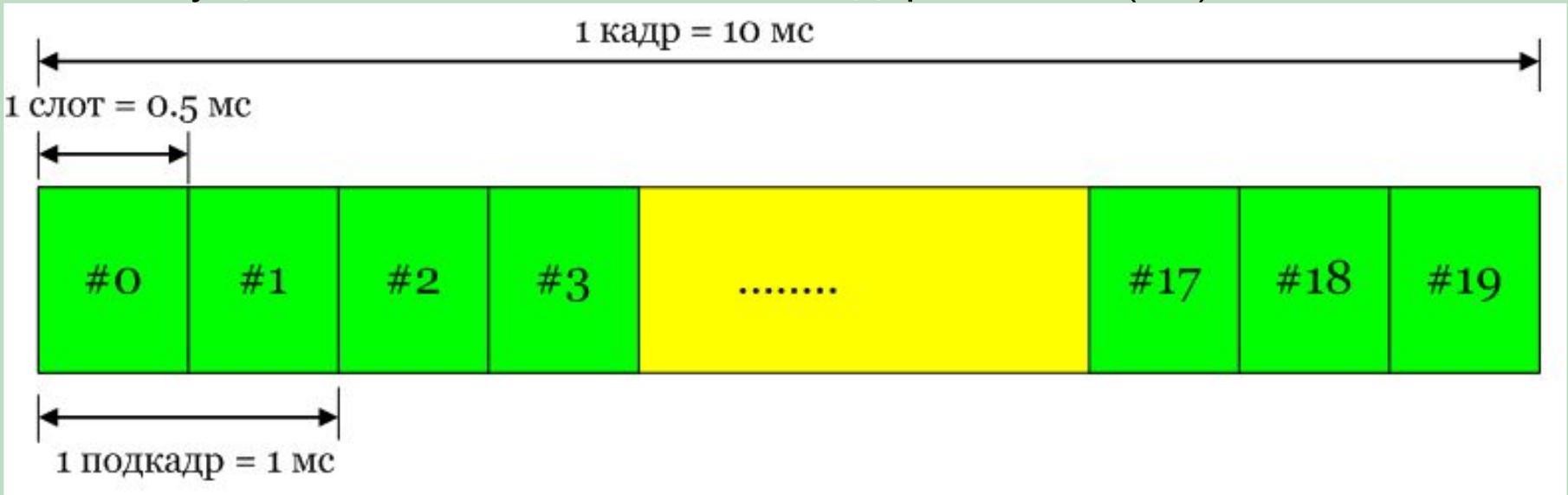


LTE кадр

- Во временной обл. последовательности OFDM символов структурируются во временные слоты
 - 2 слота составляют один подкадр (subframe)
 - 10 подкадров составляют один кадр приема/передачи (frame)
- Кадры для режимов TDD и FDD имеют различные типы
 - Для FDD - структура типа 1 (FS1, Frame Structure Type 1)
 - Для TDD - структура типа 2 (FS2, Frame Structure Type 2)
- Протяженность кадра во времени не зависит от его типа
 - Длительность кадра 10 мс
 - FS1: 1 кадр = 10 подкадров = 20 слотов
 - FS2: 1 кадр = 8 подкадров + 6 спецполя = 16 слотов+ 6 спецполя
 - 1 слот = 7/6 OFDM символов (стандартный/расширенный префикс)
- Кадры FS1 целиком используются под uplink/downlink
- Кадры FS2 разделяются между uplink и downlink

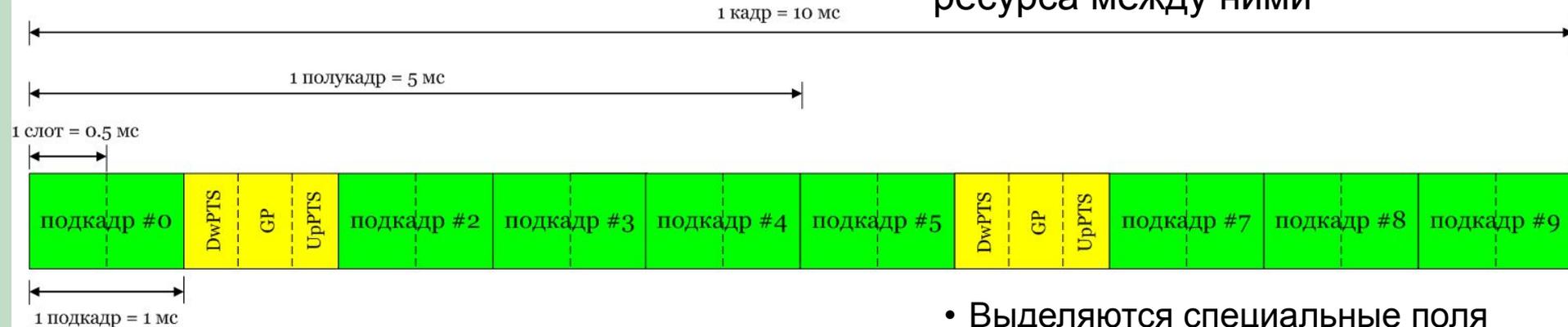
FS1. Структура кадра для FDD

- Полнодуплексный режим
 - Downlink и Uplink разнесены по частоте
- Симметричная линия
 - Downlink и Uplink потенциально могут обеспечить равные скорости передачи данных
- Структура кадра FS1 оптимизирована с точки зрения сосуществования с системами стандарта UMTS (3G)



FS2. Структура кадра для TDD

- Полудуплексный режим
 - Downlink и Uplink разнесены по времени
- Асимметричная линия
 - Скорости передачи на DL и UL регулируются распределением временного ресурса между ними



- Выделяются специальные поля DwPTS (Downlink Pilot Timeslot), GP (Guard Period) и UpPTS (Uplink Pilot Timeslot) суммарной длительностью 1 мс
- Определенные слоты зафиксированы только для UL/DL
- Распределение остальных слотов определяется заданной конфигурацией

конфигурация	номер подкадра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

LTE: FDD и TDD

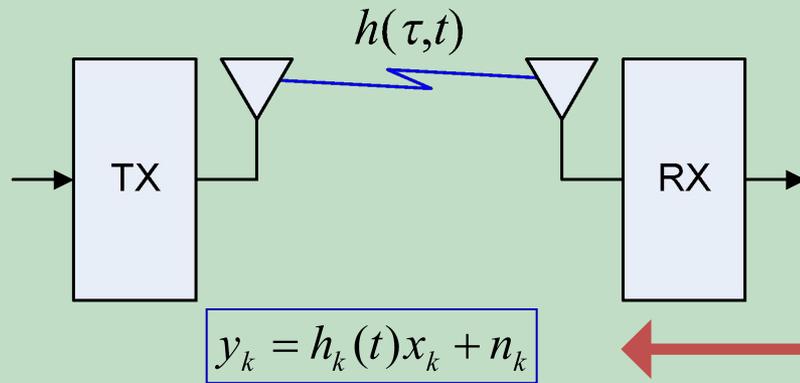
- Развертывание системы возможно как при выделении парных (FDD), так и непарных частотных диапазонов (TDD)
 - Режим частотного дуплексирования (FDD, Frequency Division Duplex): downlink и uplink разнесены по частоте
 - Режим временного дуплексирования (TDD, Time Division Duplex): downlink и uplink используют один частотный диапазон, но разнесены по времени
- LTE наследует частотные диапазоны, используемые UMTS
 - 13 FDD диапазонов
 - 8 TDD диапазонов
 - Частоты 698...2620 МГц
 - В перспективе возможно использование других диапазонов
- Дополнительная гибкость достигается за счет использования частотных полос разной ширины
 - От 1.4 МГц до 20 МГц
 - Предполагается постепенная миграция от более узких к более широким частотным полосам

MIMO

- Концепция MIMO улучшает характеристики системы за счет использования пространственного ресурса
 - Пространственное мультиплексирование (SP, Spatial Multiplexing)
 - Пространственное разнесение (SD, Spatial Diversity)
 - Лучеобразование (Beamforming)
- MIMO имеет частные случаи
 - SISO - Single Input Single Output (одна антенна на передачу и одна на прием)
 - MISO - Multiple Input Single Output (одна антенна на прием)
 - SIMO - Single Input Multiple Output (одна антенна на передачу)
- MIMO накладывает требования на обратную связь от приемника к передатчику с информацией о канале связи
 - Обратная связь отсутствует или ограничена (open loop) – «быстрые» каналы
 - Обратная связь существует (closed loop) – «медленные» каналы
- MIMO не требует физической принадлежности антенн одной базовой станции или пользователю
 - SU-MIMO (Single User MIMO) – базовая станция/один пользователь
 - MU-MIMO (Multiple User MIMO) – базовая станция/несколько пользователей
 - Co-MIMO (Cooperative MIMO) – несколько базовых станций/пользователей

MIMO. Модель сигнала

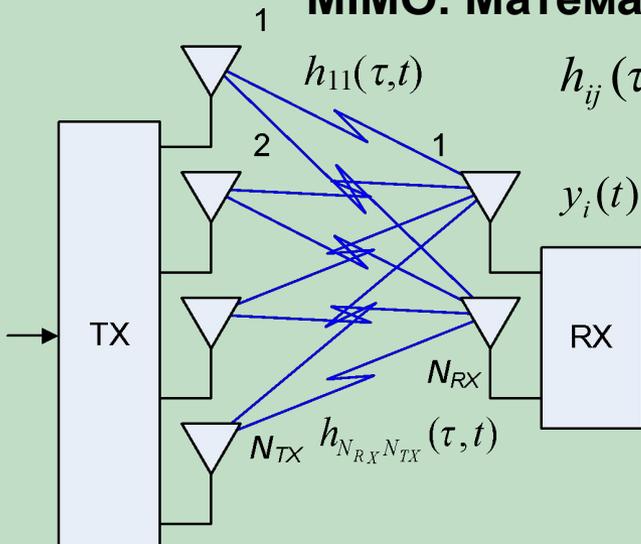
SISO. Математическая модель принятого сигнала



$$y(t) = \int_0^{\tau_{\max}} h(\tau, t)x(t-\tau)d\tau + n(t) = h(\tau, t) \otimes x(t) + n(t)$$

Если длительность ЦП больше макс. времени задержки канала τ_{\max} , то можно перейти к эквивалентному описанию в частотной обл., применив преобразование Фурье (k – индекс поднесущей)

MIMO. Математическая модель принятого сигнала



$h_{ij}(\tau, t)$ - импульсная характеристика канала между j -ой передающей и i -ой приёмной антеннами

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{N_{TX}} h_{ij}(\tau, t) \otimes x_j(t) + n_i(t) - \text{сигнал, принятый } i\text{-ой антенной}$$

$$\mathbf{H}(\tau, t) = \begin{bmatrix} h_{11}(\tau, t) & h_{12}(\tau, t) & \boxtimes & h_{1M_T}(\tau, t) \\ h_{21}(\tau, t) & h_{22}(\tau, t) & \boxtimes & h_{2M_T}(\tau, t) \\ \boxtimes & \boxtimes & \boxtimes & \boxtimes \\ h_{1N_{TX}}(\tau, t) & h_{2N_{TX}}(\tau, t) & \boxtimes & h_{N_{RX}N_{TX}}(\tau, t) \end{bmatrix} - \text{канальная матрица (во временной обл.)}$$

Матрично-векторное описание: $\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}(\tau, t) \otimes \mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t) \rightarrow \mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k(t)\mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k$

Пространственное разнесение: схема Аламоути

Рассмотрим случай $N_{RX} = 1$, $N_{TX} = 2$:

$$y_{2k} = [h_1 \quad h_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ -x_2^* \end{bmatrix} + n_{2k} \quad \text{- принятый сигнал на поднесущей } 2k$$

$$y_{2k+1} = [h_1 \quad h_2] \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1^* \end{bmatrix} + n_{2k+1} \quad \text{- принятый сигнал на соседней поднесущей } (2k+1)$$

$$\begin{bmatrix} y_{2k} \\ y_{2k+1}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_1^* & h_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ -x_2^* \\ x_2 \\ x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{2k} \\ n_{2k+1}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & -h_2 \\ h_2^* & h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{2k} \\ n_{2k+1}^* \end{bmatrix}$$

Как оценить переданный сигнал на приёмной стороне?

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \\ -h_2^* & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{2k} \\ y_{2k+1}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |h_1|^2 + |h_2|^2 & 0 \\ 0 & |h_1|^2 + |h_2|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \\ -h_2^* & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{2k} \\ n_{2k+1}^* \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2^* \end{bmatrix} = \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \\ -h_2^* & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{2k} \\ y_{2k+1}^* \end{bmatrix}$$

ОСШ при пространственном разнесении на передатчике

SISO:

$$y = hx + n$$

Оценка принятого сигнала:

$$\hat{x} = \frac{h^*}{|h|^2} y = x + \frac{h^*}{|h|^2} n = x + \tilde{n}$$

Эквивалентный шум

$$ОСШ_{SISO} \propto |h|^2$$

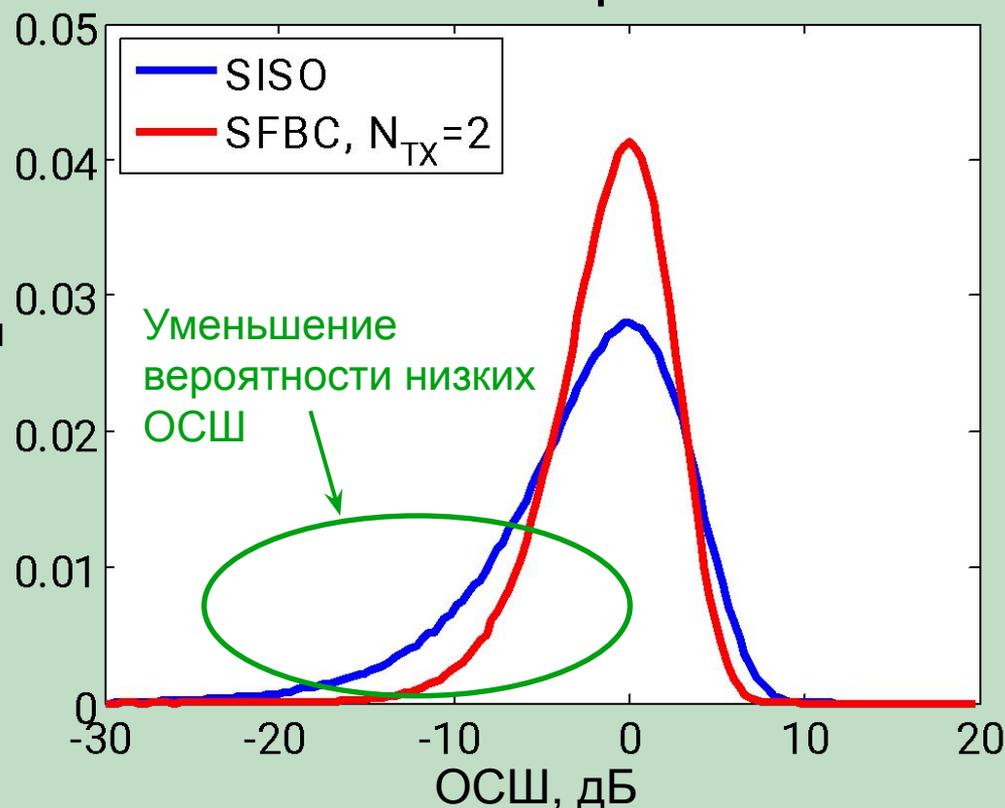
SFBC (схема Аламоути):

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2^* \end{bmatrix} = \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \mathbf{H} \begin{bmatrix} y_{2k} \\ y_{2k+1}^* \end{bmatrix}$$

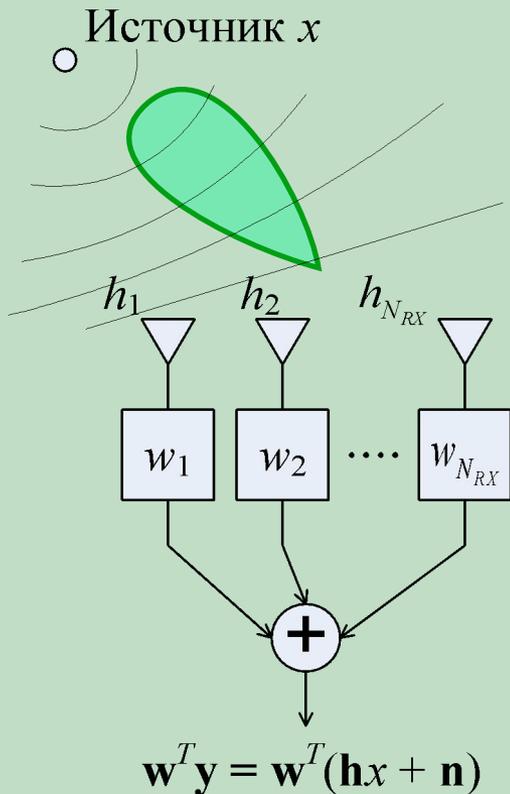
$$ОСШ_{SFBC} \propto |h_1|^2 + |h_2|^2$$

$$\mathbf{H}^H \mathbf{H} = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \mathbf{I}$$

Плотность вероятности



Формирование ДН (Beamforming)



- Вычисляя приёмные весовые коэффициенты \mathbf{w} определённым образом можно «настроиться» на источник, сформировав ДН приёмной антенной решётки
- Простой пример
 - когерентный приём в SIMO системе

$$\mathbf{w} = \mathbf{h}^*$$

$$\tilde{y} = \mathbf{w}^T \mathbf{y} = \mathbf{h}^H (\mathbf{h}x + \mathbf{n}) = \|\mathbf{h}\|^2 x + \tilde{n}$$

- В MISO системе, сформировав ДН передающей антенной решётки, можно «настроиться» на приёмник

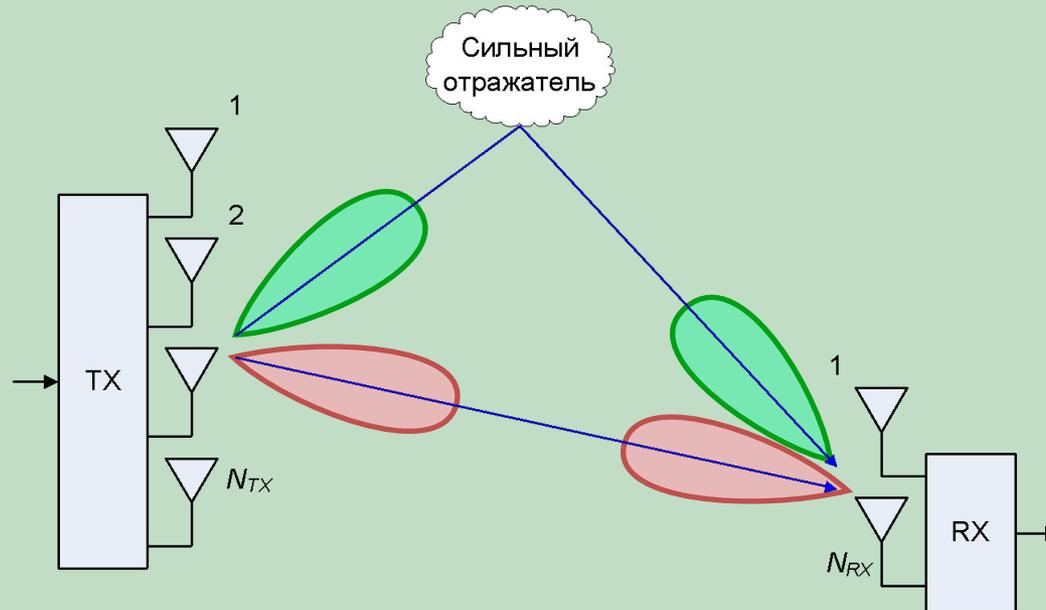
$$\mathbf{x} = \mathbf{w}s = \mathbf{h}^* s$$

$$y = \mathbf{h}^T \mathbf{x} + n = \mathbf{h}^T \mathbf{h}^* s + n = \|\mathbf{h}\|^2 s + n$$

\mathbf{w} – весовой вектор
или прекодинг

Пространственное мультиплексирование

- В **MIMO** системах возможно осуществлять параллельную передачу нескольких потоков различных данных в одном и том же частотно-временном ресурсе, т.н. пространственное мультиплексирование



IV. Передача сигналов от базовой станции к пользователю (Downlink, DL)

Отличительные особенности

- Физические каналы
 - Служебные
 - **PBCH** (Physical Broadcast Channel) – информация о соте
 - **PCFICH** (Physical Control Format Indicator Channel) – информация о формате PDCCH
 - **PDCCH** (Physical Downlink Control Channel) – информация о распределении ресурсов
 - **PHICH** (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel) – информация о результате HARQ для UL пакета, полученного БС
 - Данных
 - **PDSCH** (Physical Downlink Shared Channel) – полезные данные
 - **PMCH** (Physical Multicast Channel) – широковещательная трансляция данных одновременно нескольким абонентам (напр., аудио-, видеотрансляции)
- Сигналы
 - Данных
 - Опорные (RS, Reference Signals)
 - Первичной синхронизации (PSS, primary synchronization signal)
 - Вторичной синхронизации (SSS, secondary synchronization signal)
- Схемы модуляции
 - BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
- MIMO
 - Мультиплексирование: унитарное прекодирование с адаптацией к рангу
 - Разнесение: разнесенная передача на базе схемы Аламоути (базовая станция), разнесенный прием по схеме MRC (пользователь)
 - Количество антенн на передачу (базовая станция): 2 или 4
 - Количество антенн на прием (абонент): 2 или 4

Основные процедуры



Каналы: сигналы и модуляция

Канал	Схема модуляции
Physical Broadcast Channel (PBCH)	QPSK
Physical Downlink Control Channel (PDCCH)	QPSK
Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Physical Multicast Channel (PMCH)	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)	QPSK
Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)	BPSK-модуляция каждой из квадратур с наложением кодов Уолша
Физический сигнал	Схема модуляции
Data	OFDM
Reference Signals (RS)	Псевдослучайные последовательности (коды Голда)
Primary synchronization signal (PSS)	Последовательности Задов-Чу
Secondary synchronization signal (SSS)	Псевдослучайные последовательности (m-последовательности)

Синхронизация и поиск соты

- Осуществляется при помощи детектирования двух служебных последовательностей: PSS и SSS

Детектирование PSS	Определение временных границ слотов, Physical layer ID
--------------------	--

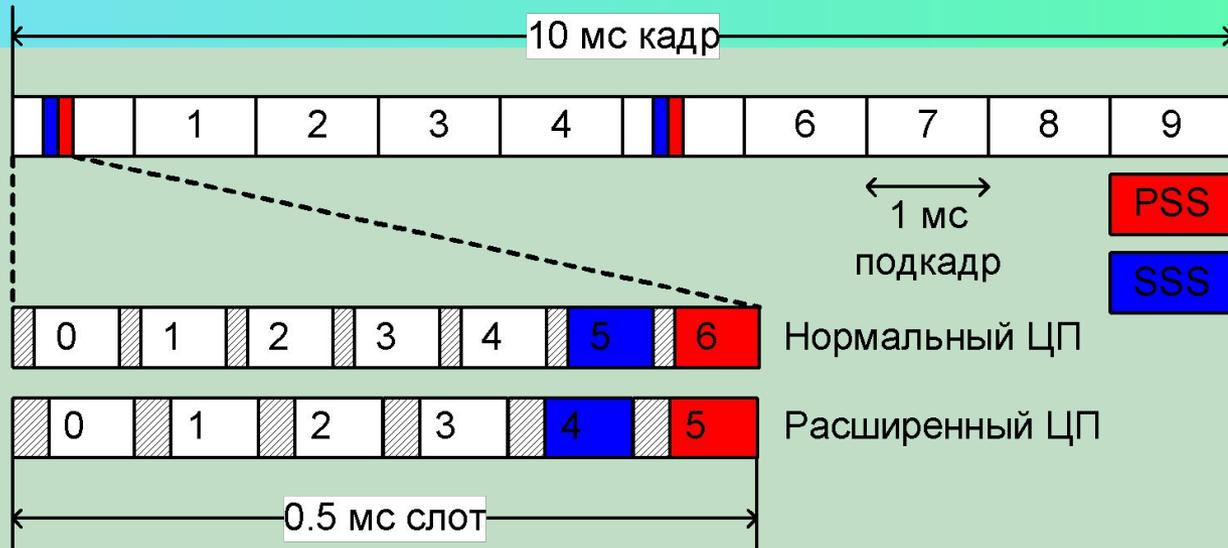
Детектирование SSS	Определение временных границ фреймов, Cell ID, длины ЦП, TDD/FDD
--------------------	--

Детектирование RS	Осуществление измерений уровня принимаемой мощности (RSRP)
-------------------	--

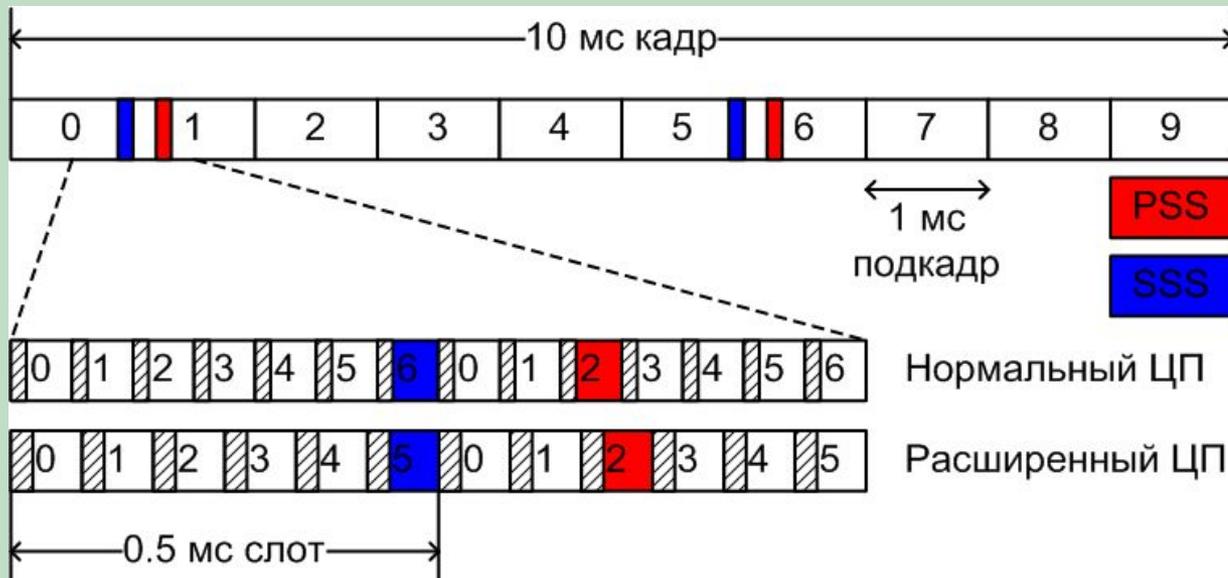
Декодирование PBCH	Определение временных границ PBCH, доступ к системной информации
--------------------	--

PSS, SSS во временной области

FDD



TDD



PSS, SSS в частотной области

- В частотной области PSS, SSS занимают центральные 6 ресурсных блока вне зависимости от ширины используемой полосы частот



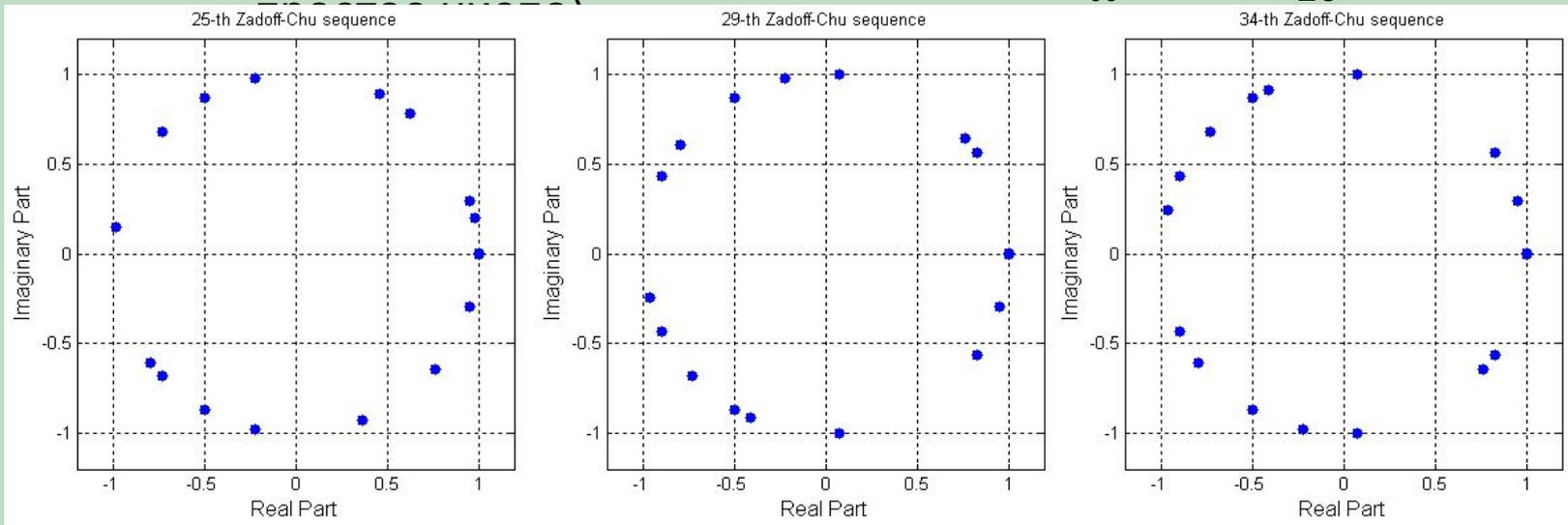
Последовательности Задова-Чу

- Генерация в явном виде
 - Произвольная длина N_{ZC}
 - Параметризация двумя параметрами: индексом u и циклическим сдвигом k

$$s_u[n-k] = \exp\left\{-j2\pi u \frac{(n-k)(n-k+1)}{2N_{ZC}}\right\}$$

$k=0$ □ “root sequence”

- CAZAC: Constant Amplitude Zero Auto-Correlation
 - Одинаковые свойства как в частотной, так и временной областях
 - Постоянная огибающая
 - Идеальная автокорреляция (круговая): $r_{ac} = N_{ZC}, \tau = 0, r_{ac} = 0, \tau \neq 0$
 - Хорошая кросс-корреляция (круговая): $r_{cc} \leq \text{sqrt}(N_{ZC}), \tau \neq 0$ (если N_{ZC}



PSS
N=63

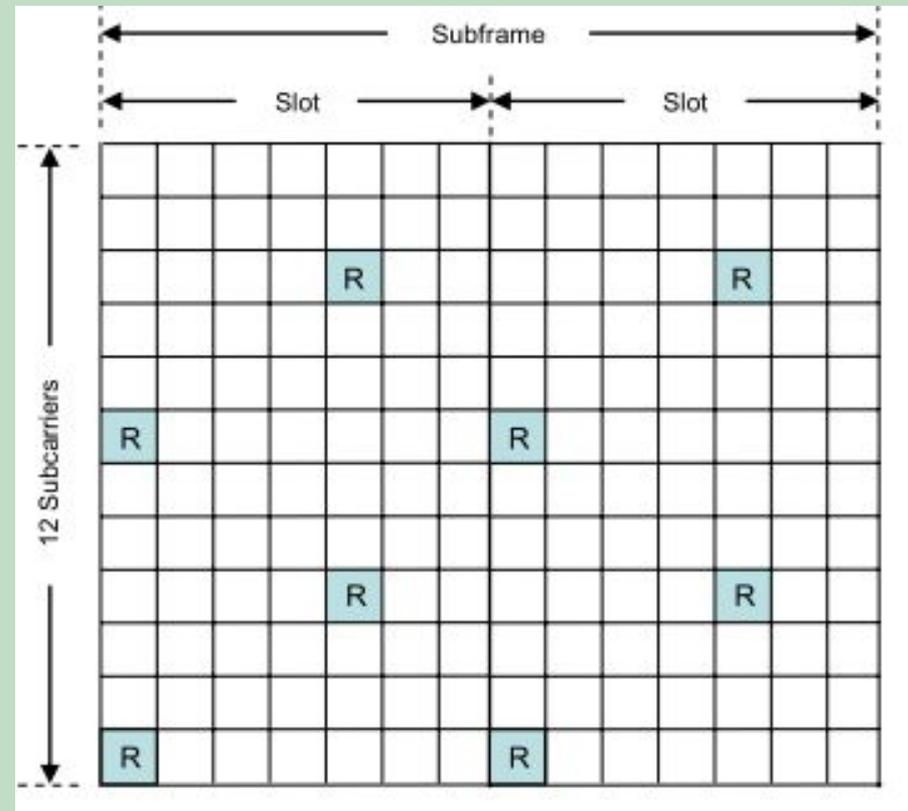
Опорные (пилотные) сигналы

- Опорный сигнал используется приемником для оценки искажений амплитуды и фазы сигнала
 - Сигнал, генерируемый передатчиком, искажается каналом передачи
 - Информация об искажениях, вносимых каналом передачи, позволяет демодулировать сигналы с QAM-модуляцией
- Каждой соте (сектору) присваивается уникальный опорный сигнал
 - Охватывает всю полосу частот
 - Является псевдослучайной последовательностью
 - Имеет 2D-структуру, то есть является функцией времени и частоты
 - Генерируется на базе одного из 504 уникальных CELL-ID
 - CELL-ID определяется сочетанием одного из 3 первичных сигналов синхронизации (PSS) и одного из 168 вторичных сигналов синхронизации (SSS)
- Опорные сигналы разных сот мультиплексируются с использованием кодового разделения
 - Передаются на одних и тех частотах в одно и тоже время
 - Для разделения используются ортогональные коды
- В режиме MIMO опорные сигналы для каждой антенны мультиплексируются с использованием частотного разделения
 - Количество ресурсов, занимаемых служебной информацией, увеличивается

Распределение пилотных поднесущих по ресурсному блоку

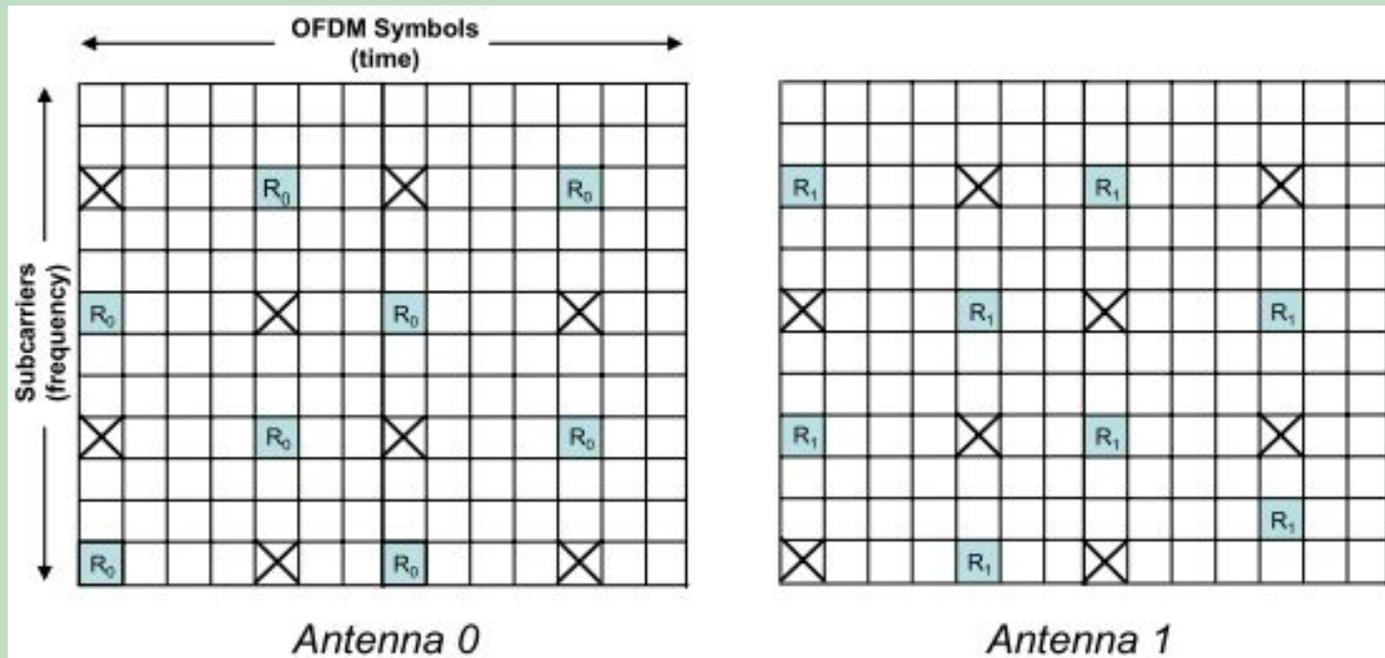
- В downlink пилотные сигналы передаются на:
 - 1-ой и 7-ой поднесущих 1-го OFDM-символа,
 - 4-ой и 10-ой поднесущих 5-го OFDM-символа
- Коэффициент передачи канала измеряется на пилотных поднесущих
- Для определения коэффициента передачи канала на остальных поднесущих используется процедура интерполяции

1. Одна передающая антенна на базовой станции



Распределение пилотных поднесущих по ресурсному блоку

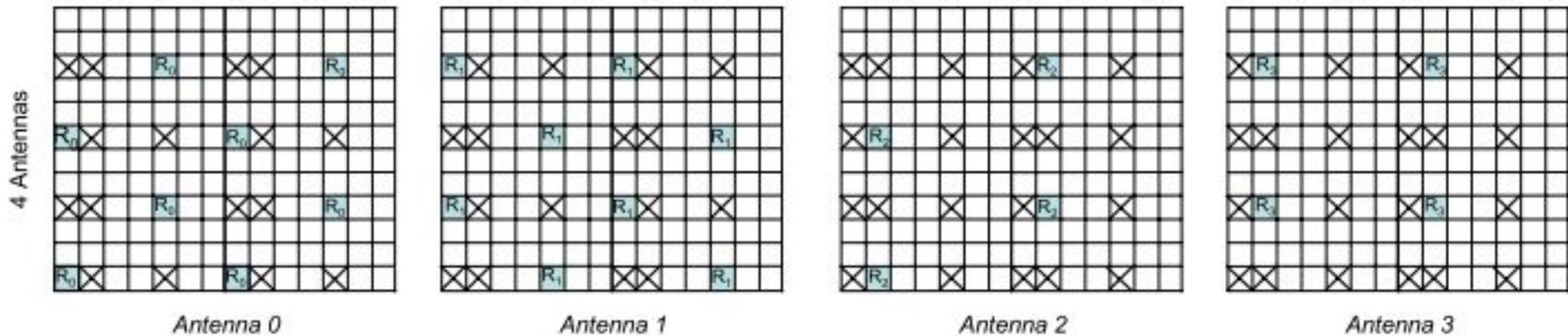
2. Две передающие антенны на базовой станции



- R_0 – пилотный сигнал, излучаемый из антенны 0
- R_1 – пилотный сигнал, излучаемый из антенны 1
- Крестиками показаны неиспользуемые поднесущие

Распределение пилотных поднесущих по ресурсному блоку

3. Четыре передающие антенны на базовой станции



- R_0 – пилотный сигнал, излучаемый из антенны 0
- R_1 – пилотный сигнал, излучаемый из антенны 1
- R_2 – пилотный сигнал, излучаемый из антенны 2
- R_3 – пилотный сигнал, излучаемый из антенны 3
- Крестиками показаны неиспользуемые поднесущие

Пример оценивания канала

$$y_j = h_j p_j + n_j$$

h_j – коэффициент частотной характеристики канала для j -ой пилотной поднесущей;

p_j – опорный QPSK сигнал, передаваемый на j -ой поднесущей;

Оценка наименьших квадратов для пилотных поднесущих:

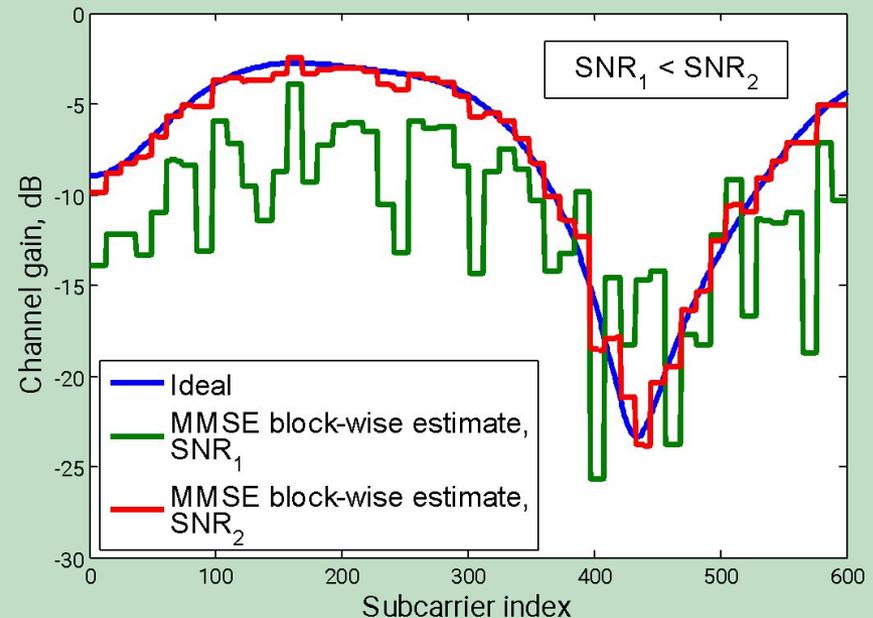
$$\hat{h}_j^{LS} = p_j^* y_j = h_j + p_j^* n_j = h_j + \tilde{n}_j$$

Сглаживание МСКО фильтром \mathbf{R}_{MMSE} для остальных поднесущих:

$$\hat{\mathbf{h}}^{MMSE} = \mathbf{R}_{MMSE} \hat{\mathbf{h}}^{LS} = \mathbf{R}_{hp} \mathbf{R}_{pp}^{-1} \hat{\mathbf{h}}^{LS}$$

Кросс-корреляционная матрица между пилотными и всеми поднесущими

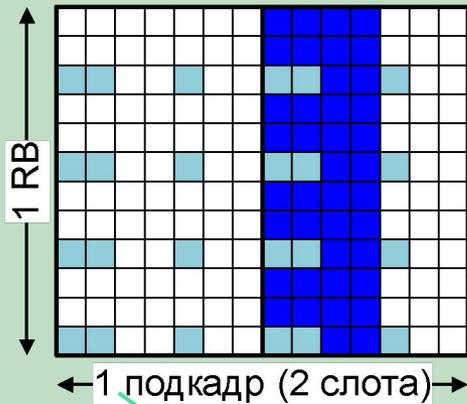
Автокорреляционная матрица между пилотными поднесущими



РВСН. Общая информация

- Служит для широковещательной трансляции основного блока служебной информации (Master Information Block, **MIB**), состоящего из 14 бит
 - Ширина используемой полосы частот
 - Размер канала РНІСН
 - 8 старших бит, кодирующих системный номер кадра (System Frame Number, SFN)

РВСН



■ РВСН

■ пилотные поднесущие

MIB 14 информационный + 10 нулевых бит

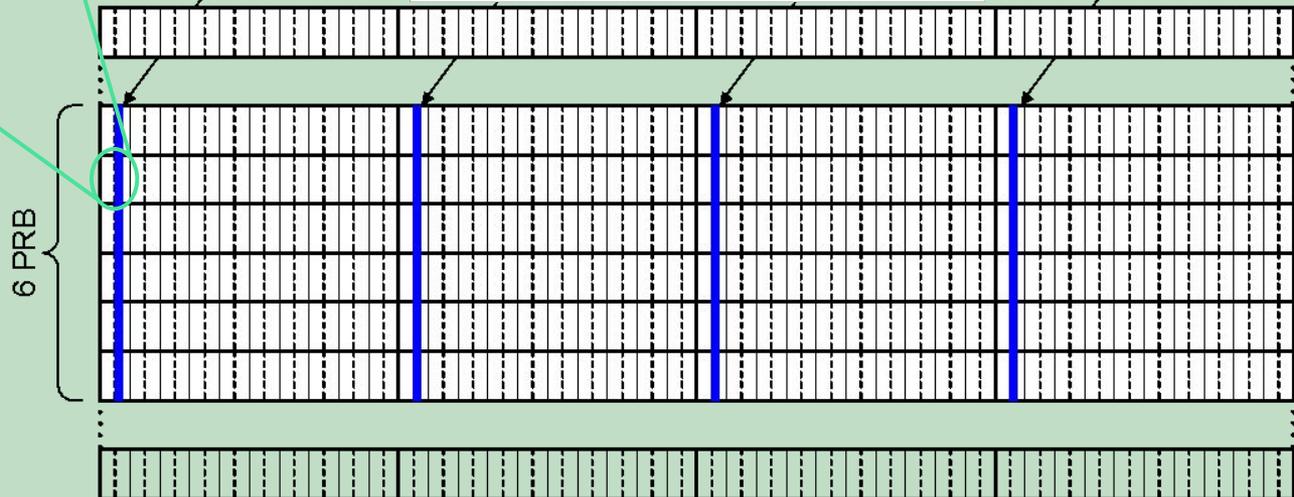
CRC Добавление 16 проверочных бит

Помехоустойчивое свёрточное кодирование, скремблирование, QPSK модуляция, пространственная обработка

Сегментация на 4 одинаковых блока, достаточных для декодирования РВСН

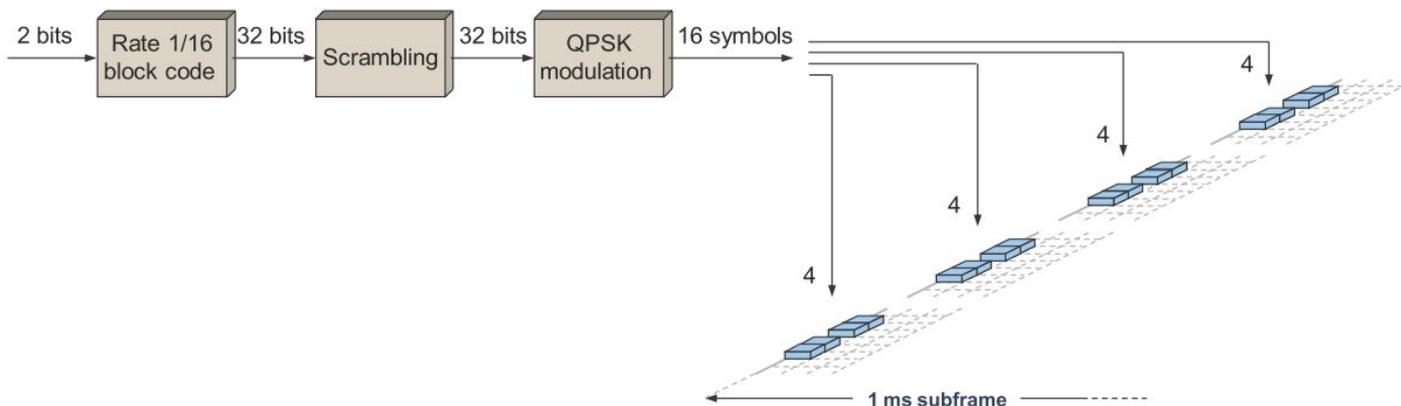
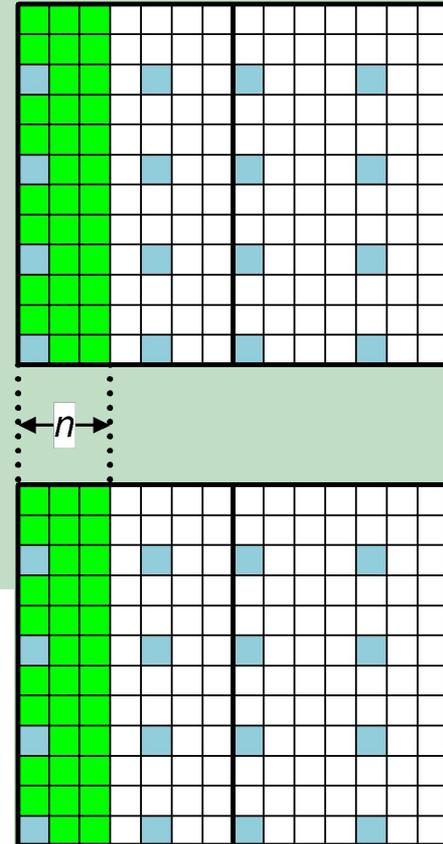


40 мс (4 кадра) – периодичность РВСН



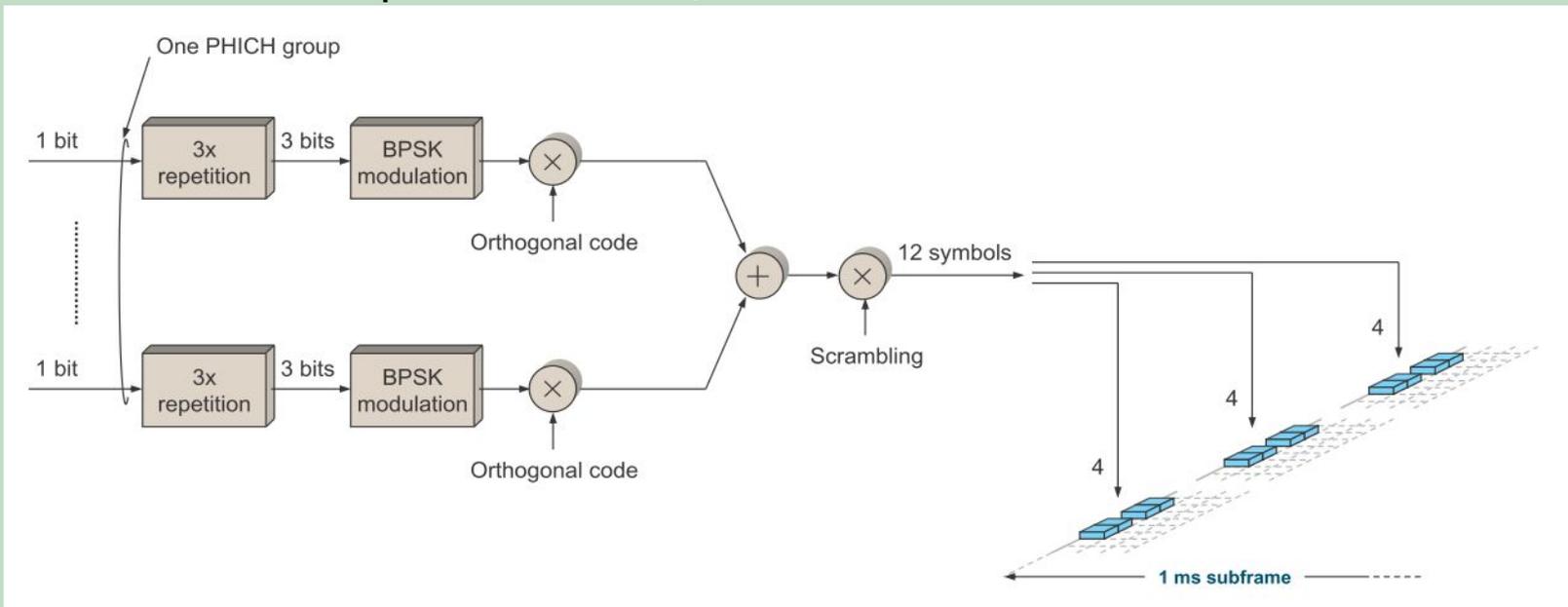
Каналы управления: РСFICH

- Служит для передачи информации о размере контрольного региона n (в OFDM символах)
- Передается в первом OFDM символе
- Для большей защиты от селективных замираний канала ресурсные элементы РСFICH равномерно разнесены по всей используемой полосе частот



Каналы управления: PHICH

- Передаёт подтверждение для транспортного блока, посланного в UL (1 бит)
- Каналы PHICH для различных транспортных блоков могут передаваться на одних и тех же ресурсных элементах, образуя группу PHICH
 - Используется кодовое разделение (коды Уолша длины 4)
- Количество PHICH групп и OFDM символов, которые PHICH может занимать во времени сообщается в MIB

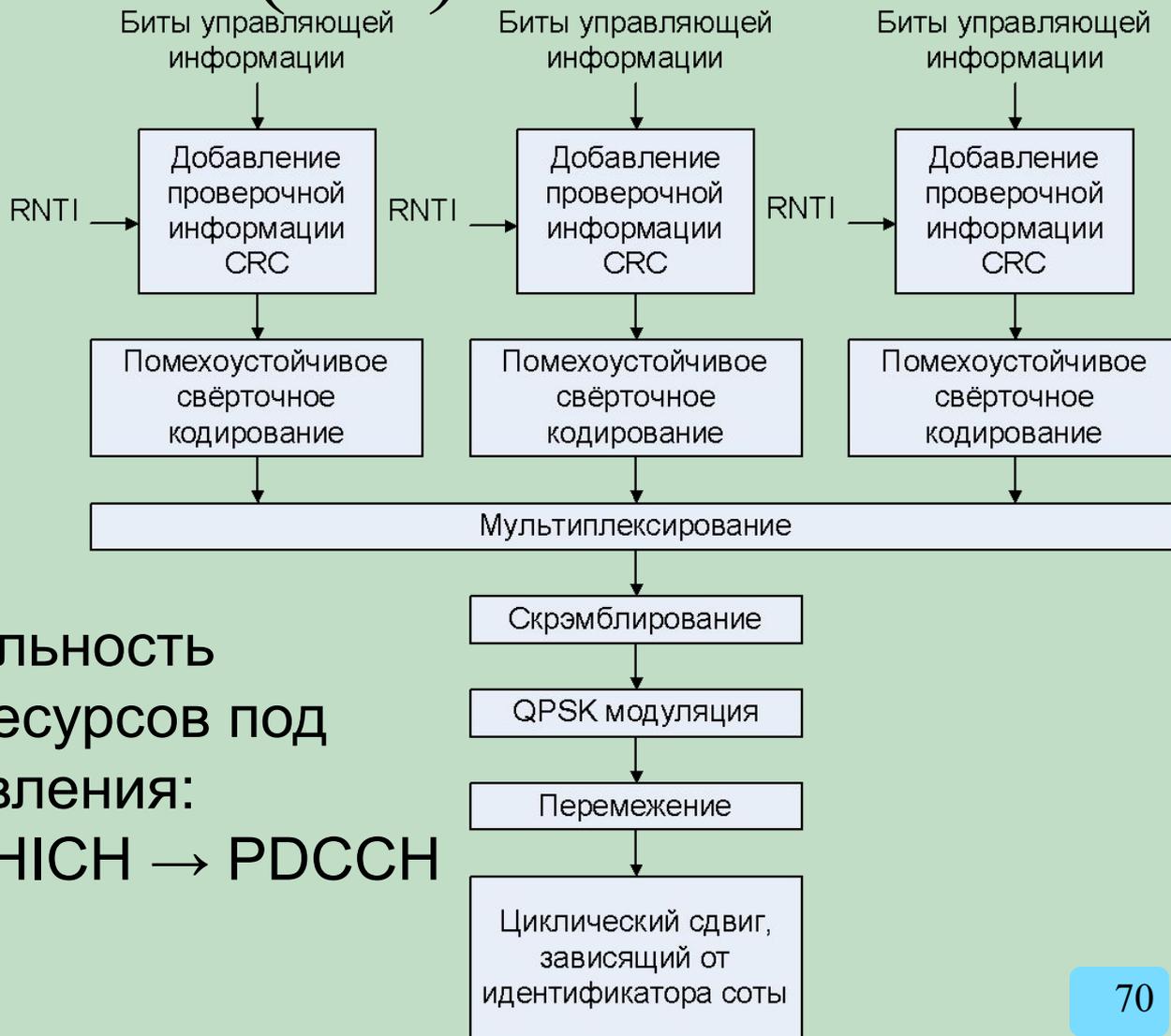


Каналы управления: PDCCH (1/2)

- Служит для передачи сигналов управления (Downlink Control Information, DCI)
 - **Downlink assignments** – управляющая информация для успешного декодирования канала данных PDSCH
 - Индикация физических блоков, на которых абоненты передаются данные в канале PDSCH
 - Формат передачи: схема модуляции и кодирования
 - Информация об используемой пространственной обработке сигналов
 - HARQ информация
 - **Uplink grants** – управляющая информация для передачи данных от пользователя на базовую станцию
 - Индикация физических блоков, на которых абоненту разрешено передавать данные в канале PUSCH
 - Формат передачи: схема модуляции и кодирования
 - HARQ информация
 - Команды управления мощностью передаваемых абонентом сигналов
 - **Power control** – дополнительные команды управления мощностью сигналов, передаваемых с пользовательских терминалов

Каналы управления: PDCCH

(2/2)



- Последовательность выделения ресурсов под каналы управления: PCFICH → PHICH → PDCCH

PDSCN: Общие сведения (1/2)

- Передача пользовательских данных от базовых станций абонентам
 - Осуществляется транспортными блоками каждый подкадр (1 мс)
 - До 2-х транспортных блоков передаётся одному абоненту за 1 подкадр
 - Транспортный блок – это блок информационных бит (до помехоустойчивого кодирования). Блок бит после помехоустойчивого кодирования (кодированных бит) – кодовое слово
- Передача блоков системной информации (**SIB** – System Information Block), которая не передаётся в PDSCN
- Передача сигналов вызова абонентов (**paging**)

PDSCH: Общие сведения (2/2)

- Сигналы PDSCH передаются с помощью различных режимов (**TM** - Transmission Mode)
- Режим передачи – это конкретная схема пространственной обработки + используемые опорные сигналы для демодуляции PDSCH и получения информации о качестве канала
- Каждому режиму передачи соответствует свой формат служебных сообщений DCI канала PDSCH

Режимы передачи PDSCH

- TM1 – Передача сигналов с помощью одной антенны (без пространственной обработки)
- TM2 – Пространственное разнесение
- TM3 – Пространственное мультиплексирование с ограниченной обратной связью между абонентом и БС (**open-loop**)
- TM4 – Пространственное мультиплексирование без ограничений на обратную связь (**closed-loop**)
- TM5 – MU-MIMO
- TM6 – Closed-loop передача одного пространственного потока
- TM7 – Передача 1 потока с использованием для демодуляции прекодированных опорных сигналов (UE-RS)
- TM8 – Передача до 2 пространственных потоков с использованием UE-RS для демодуляции
- TM9 – Передача до 8 пространственных потоков с использованием UE-RS для демодуляции

Rel-9

Rel-10

Downlink MIMO: Пространственное мультиплексирование

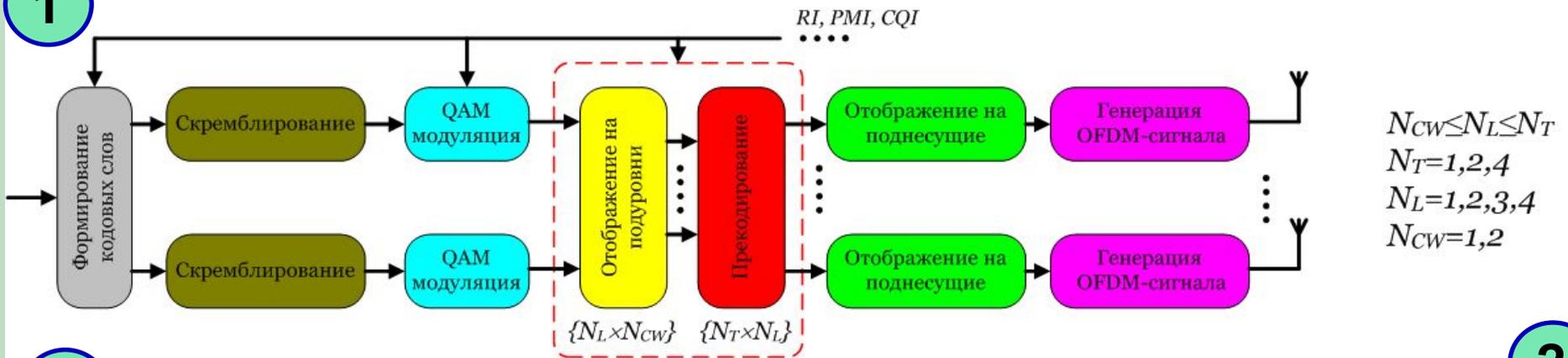
- Применяется только для канала данных (PDSCH)
 - Опорные сигналы и сигналы синхронизации также не охватываются
- Требуется обратной связи от абонента
 - Closed-loop: индекс матрицы прекодирования (**PMI**, Precoding Matrix Indicator), информация о качестве канала связи (**CQI**, Channel Quality Information), ранг канальной матрицы (**RI**, Rank Indicator)
 - Open-loop: информация о качестве канала связи (**CQI**, Channel Quality Information), ранг канальной матрицы (**RI**, Rank Indicator)
- Детализация параметров, передаваемых по обратной связи (ОС), зависит от текущих условий и требований
 - Параметр RI всегда одинаковый для всей полосы частот, выделенной абоненту
 - Широкополосная ОС: единые значения CQI/PMI на всю полосу частот
 - Узкополосная ОС: свои значения CQI/PMI на каждый блок поднесущих
- Информация о ранге канальной матрицы позволяет динамически изменять характеристики линии связи
 - При $RI > 1$ – увеличение скорости передачи (несколько потоков)
 - При $RI = 1$ – увеличение зоны покрытия (TxD) или емкости сети (MU-MIMO) 74

Пространственное мультиплексирование Closed-loop

- Весовыми векторами передающей антенной решётки базовой станции служат вектор-столбцы матриц прекодирования
- Набор матриц прекодирования – кодовая книга – ограничен и является компромиссом между эффективностью и простотой реализации
 - Кодовая книга состоит из 4 или 16 матриц (Rel-8) для 2 и 4 антенн, соответственно
 - Обладает свойством унитарности, вложенности, ограниченного алфавита, равной мощности

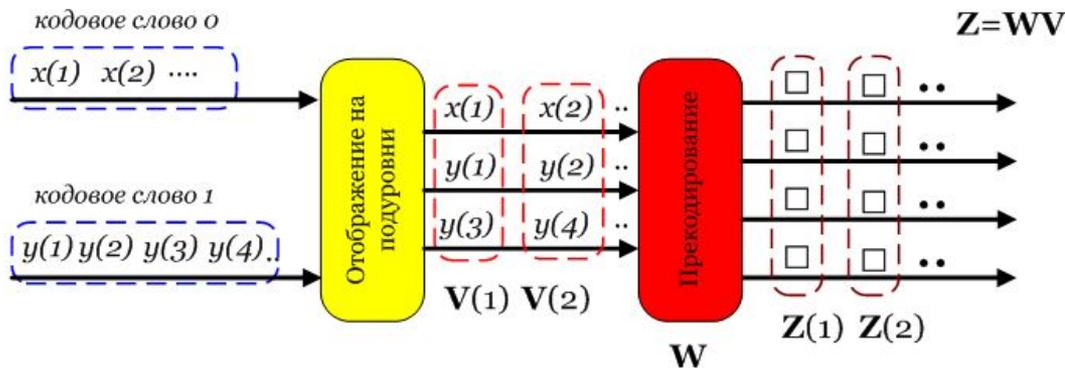
Пример пространственного мультиплексирования Closed-loop

1



3

Пример: $N_T=4, N_L=3, N_{CW}=2$



2

Пример: $N_T=2$

индекс кодированной книги	количество подуровней	
	1	2
0	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
1	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$
2	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & -j \end{bmatrix}$
3	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$	-

количество подуровней	количество кодовых слов	схема отображения
1	1	$v_1(i) = x(i)$
2	1	$v_1(i) = x(2i)$ $v_2(i) = x(2i+1)$
2	2	$v_1(i) = x(i)$ $v_2(i) = y(i)$

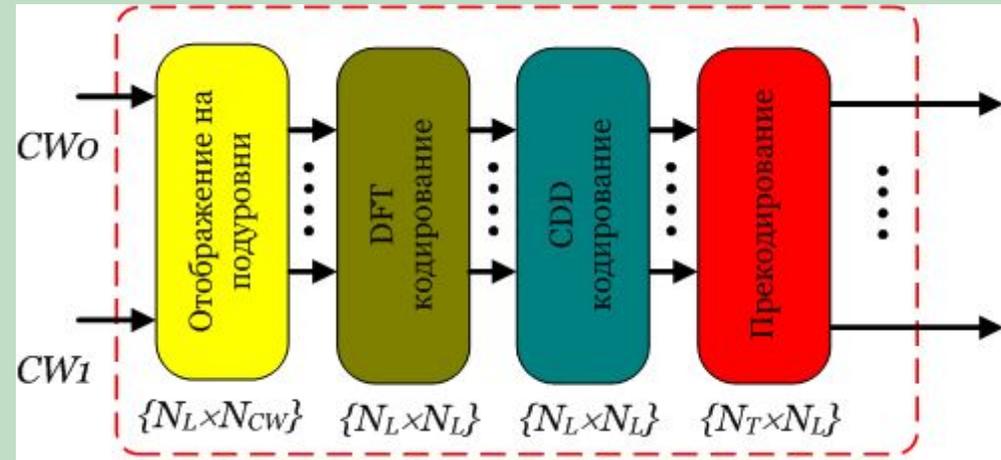
Пространственное мультиплексирование Open-loop

- При ограничениях на ОС реализуется режим open-loop
 - Пользователь передает на базовую станцию RI и CQI
 - Выполняется условие $RI > 1$, иначе используется режим разнесения
- Без знания PMI базовая станция последовательно применяет predetermined матрицы прекодирования
 - Матрицы прекодирования выбираются из кодовой книги, доступной для текущего значения RI при заданном числе антенн (N_T)
 - Обеспечивается дополнительная пространственная декорреляция
- Пространственная декорреляция усиливается за счет дополнительного кодирования
 - Кодирование на базе дискретного Фурье-преобразования
 - Разнесение с циклической задержкой (CCD, Cyclic Delay Diversity)

Пример пространственного мультиплексирования Open-loop

$$\begin{bmatrix} z_0(i) \\ \vdots \\ z_{N_T}(i) \end{bmatrix} = \mathbf{W}(i) \begin{bmatrix} v_0(i) \\ \vdots \\ v_{N_L}(i) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{W}(i) = \mathbf{P}(i)\mathbf{D}(i)\mathbf{U}$$



Сигнал на i -ой поднесущей до пространственной обработки

Сигнал на i -ой поднесущей после пространственной обработки

- $\mathbf{P}(i)$ – predetermined matrix of precoding from the codebook for signals on the i -th subcarrier
- \mathbf{U} – fixed DFT matrix
- $\mathbf{D}(i)$ – diagonal matrix of phase shifts for signals on the i -th subcarrier as a result of CDD

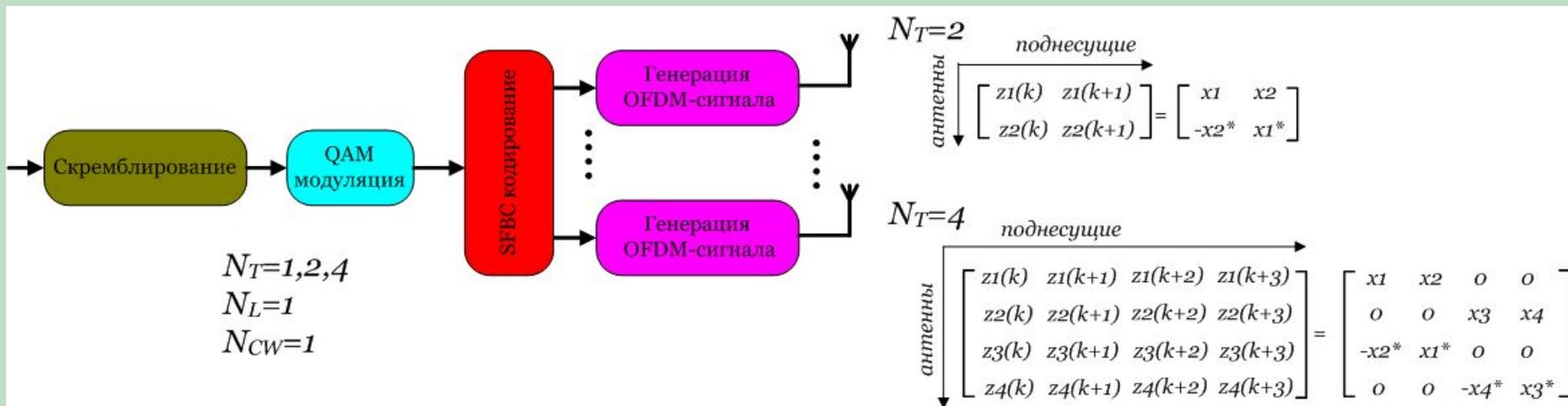
$$\mathbf{U} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{-j2\pi/3} & e^{-j4\pi/3} \\ 1 & e^{-j4\pi/3} & e^{-j8\pi/3} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}(i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-j2\pi i/3} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-j4\pi i/3} \end{bmatrix}$$

Пример для $N_L=3$

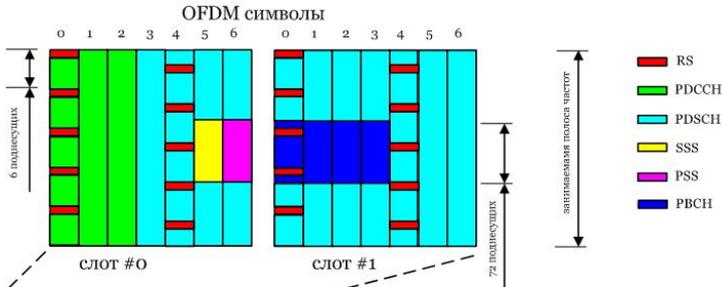
Разнесённая передача (TxD)

- Используется для борьбы с замираниями
 - Автоматически включается при RI=1 в режиме TM3
- Кроме канала данных (PDSCH) применяется в PBCH, а так же в каналах управления (PCFICH, PHICH, PDCCH)
- Не требует обратной связи
 - Уменьшается объем служебной информации
 - Снижаются ограничения на скорость движения пользователя
- Возможны различные режимы (Tx diversity)
 - Пространственно-частотное блочное кодирование (SFBC)
 - Коммутируемая передача (Switched TxD)



Каналы downlink

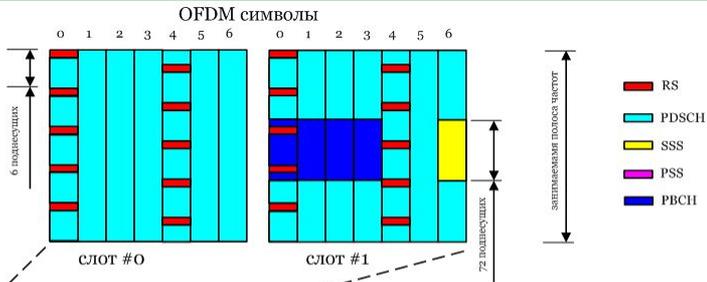
- Режим FDD



подкадр #0

кадр

- Режим TDD



подкадр #0

подкадр #5

DwPTS

кадр

DwPTS

**Передача сигналов от пользователя
к базовой станции (Uplink, UL)**

Отличительные особенности

- Физические каналы
 - Physical Uplink Control Channel (**PUCCH**) – передача служебной информации (HARQ ACK/NACK, информация о состоянии канала CQI/RI/PMI) от абонента на базовую станцию
 - Physical Uplink Shared Channel (**PUSCH**) – передача пользовательских данных
 - Physical Random Access Channel (**PRACH**) – случайный доступ для установления соединения
- Сигналы
 - Данных
 - Опорные сигналы
 - Для демодуляции (Demodulation Reference Signals - DMRS)
 - Для прозвонки/зондирования канала (Sounding Reference Signals - SRS)
- Модуляция
 - BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
- MIMO
 - Пространственное мультиплексирование: MU-MIMO с формированием ДН приёмной антенной решётки базовой станции
 - Пространственное разнесение: разнесённая передача с коммутацией антенн (UE), разнесённый приём по схеме MRC (базовая станция)
 - Количество антенн на передачу (UE): 2 (но используется 1 передающий тракт, Rel-8)
 - Количество антенн на приём (базовая станция): 2 или 4

Основные процедуры



Каналы: сигналы и модуляция

Канал	Схема модуляции
PUCCH	BPSK, QPSK
PUSCH	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
PRACH	Последовательности Задов-Чу
Физический сигнал	Схема модуляции
Data	DFT-S-OFDM
Demodulation RS	Последовательности Задов-Чу
Sounding RS	Последовательности Задов-Чу

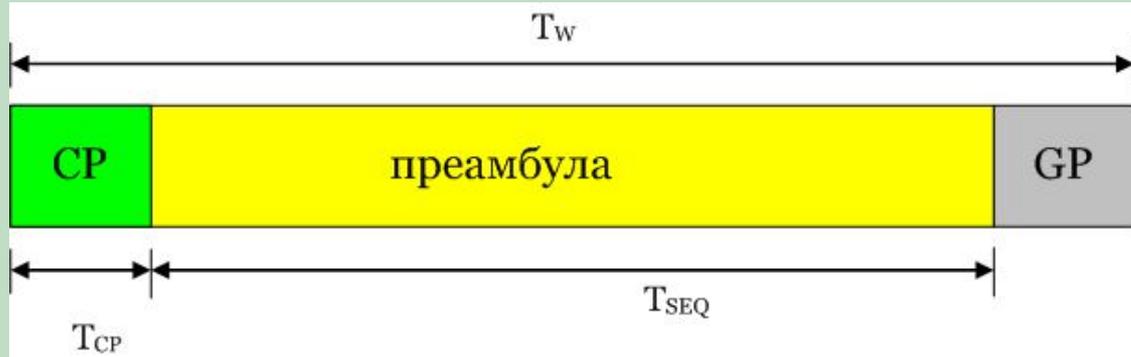
Процедура случайного доступа

- Необходима для установления начального соединения и временной подстройки uplink передачи
- Реализуется в 4 шага
 1. Посылка преамбулы (PRACH)
 2. Ответ на запрос доступа (преамбулу) (PDSCH)
 - Данное сообщение содержит информацию о подстройке временных параметров UL передачи, временный идентификатор абонента в соте C-RNTI, грант на UL ресурсы для последующей передачи L2/L3 сообщений
 3. Посылка L2/L3 сообщения (PUSCH)
 - В данном сообщении абонент передаёт свой идентификатор (C-RNTI, если уже его имел, или др. сетевой идентификатор)
 4. Посылка сообщения, разрешающего конфликт случайного доступа (PDSCH)

PRACH

- Конкурентный механизм доступа при установлении соединения реализуется через канал PRACH путем посылки преамбулы
 - По частоте PRACH занимает 6 RB, а его конкретное положение в частотно-временной сетке сигнализируется в широкополосных блоках системной информации
 - Все пользователи могут равновероятно начать процедуру соединения
- Преамбула формируется из последовательности Zadoff-Chu
 - Индекс базовой последовательности транслируется абонентам в широкополосных блоках системной информации
 - Последовательности, используемые абонентами, являются циклическими сдвигами базовой последовательности (общее число различных последовательностей = 64)
 - При использовании абонентами одного значения сдвига возникает конфликт, разрешаемый базовой станцией

Форматы преамбулы случайного доступа



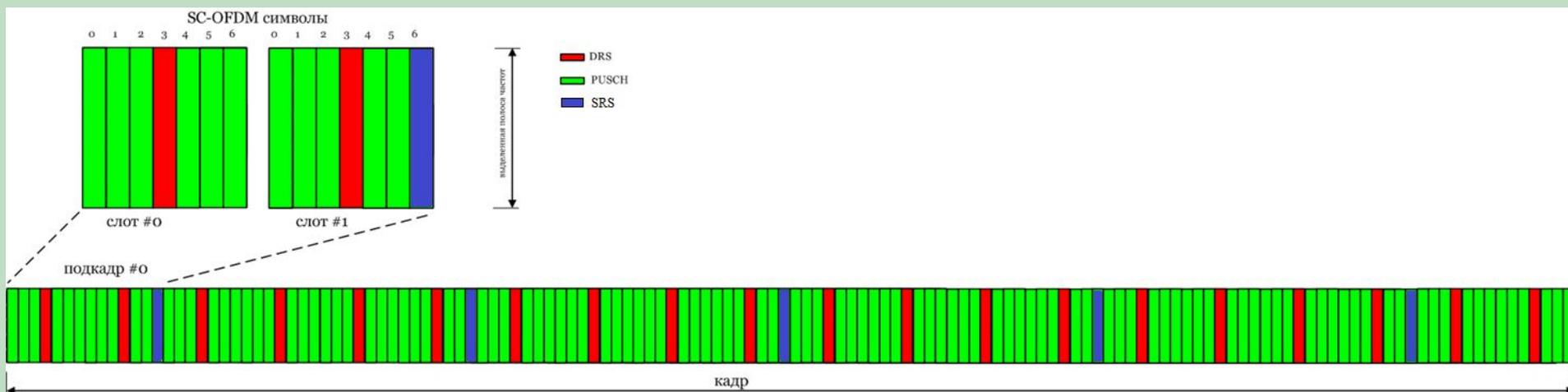
Формат	T_{CP} , мкс	T_{SEQ} , мкс	T_w , мкс
0	103	800	1000
1	684	800	2000
2	203	1600	2000
3	684	1600	3000
4	14.6	133	-



Используется в TDD в течение времени поля U_pPTS подкадра специального типа

Опорные сигналы

- Опорные сигналы демодуляции (DMRS)
 - Используются приемником БС непосредственно для демодуляции сигналов от абонента
 - Занимают полосу частот, совпадающую с полосой частот передачи данных, выделенной абоненту
 - Передаются в середине каждого слота (PUSCH), выделенного абоненту
- Опорные сигналы зондирования (SRS)
 - Используются базовой станцией при распределении ресурсов в условиях отсутствия передачи от абонента
 - Занимают полосу частот, назначаемую базовой станцией
 - Передаются периодически, занимают последний OFDM символ UL подкадра
 - Параметры передачи SRS конфигурируются базовой станцией с помощью RRC



Мультиплексирование опорных сигналов

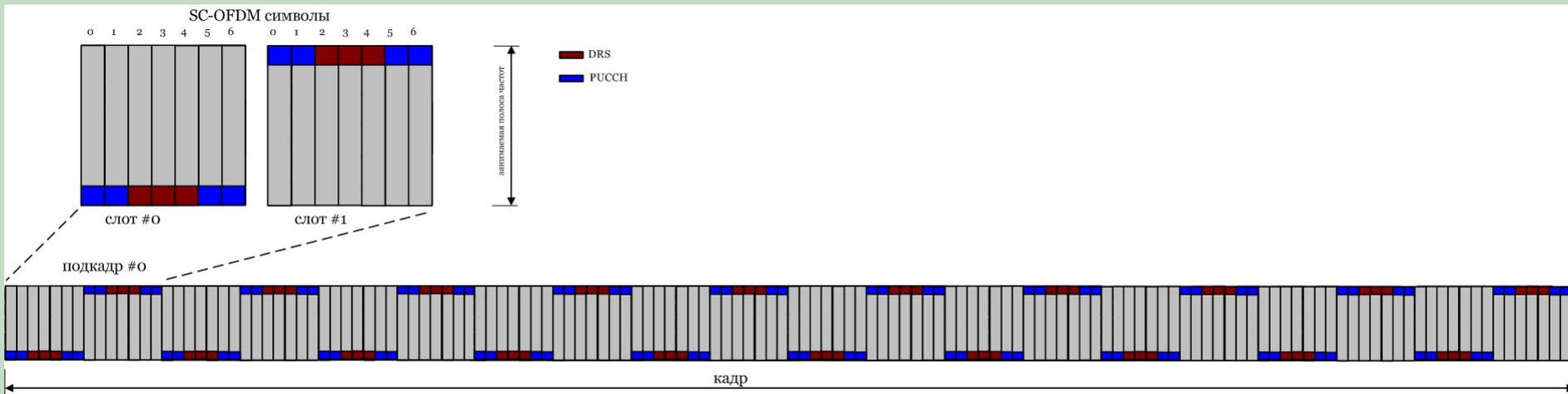
- Способ мультиплексирования опорных сигналов демодуляции зависит от режима MIMO
 - Разнесение с коммутацией антенн: частотное разделение
 - MU-MIMO: кодовое разделение сигналов от каждого абонента
- Способ мультиплексирования опорных сигналов зондирования зависит от заданной полосы частот
 - Одинаковая полоса частот для зондирования каналов нескольких абонентов: кодовое разделение
 - Разные полосы частот для зондирования каналов нескольких абонентов: кодовое + частотное разделение

Канал управления PUSCH

- Используется для периодической передачи от абонента на базовую станцию служебной информации
 - Подтверждение успешной передачи DL транспортных блоков либо запрос повторной передачи HARQ
 - Передача информации о состоянии канала (RI/CQI/PMI) для процедуры распределения ресурсов
 - Запрос ресурсов канала PUSCH для UL передачи пользовательских данных от абонента на БС
- PUSCH имеет несколько форматов, различающихся количеством передаваемых бит служебной информации
- Сигналы PUSCH передаются на крайних ресурсных блоках UL полосы частот

Пример канала PUSCH

- Режим FDD: PUSCH Format 1



Литература и ссылки

- <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36-series.htm>
 - **TS 36.211** “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation”
 - **TS 36.212** “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding”
 - **TS 36.213** “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures”
- Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Academic Press. 2011.
- Sesia S., Toufik I., Baker M., LTE—the UMTS long term evolution: from theory to practice. – 2nd ed. Wiley. 2011.