

# **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

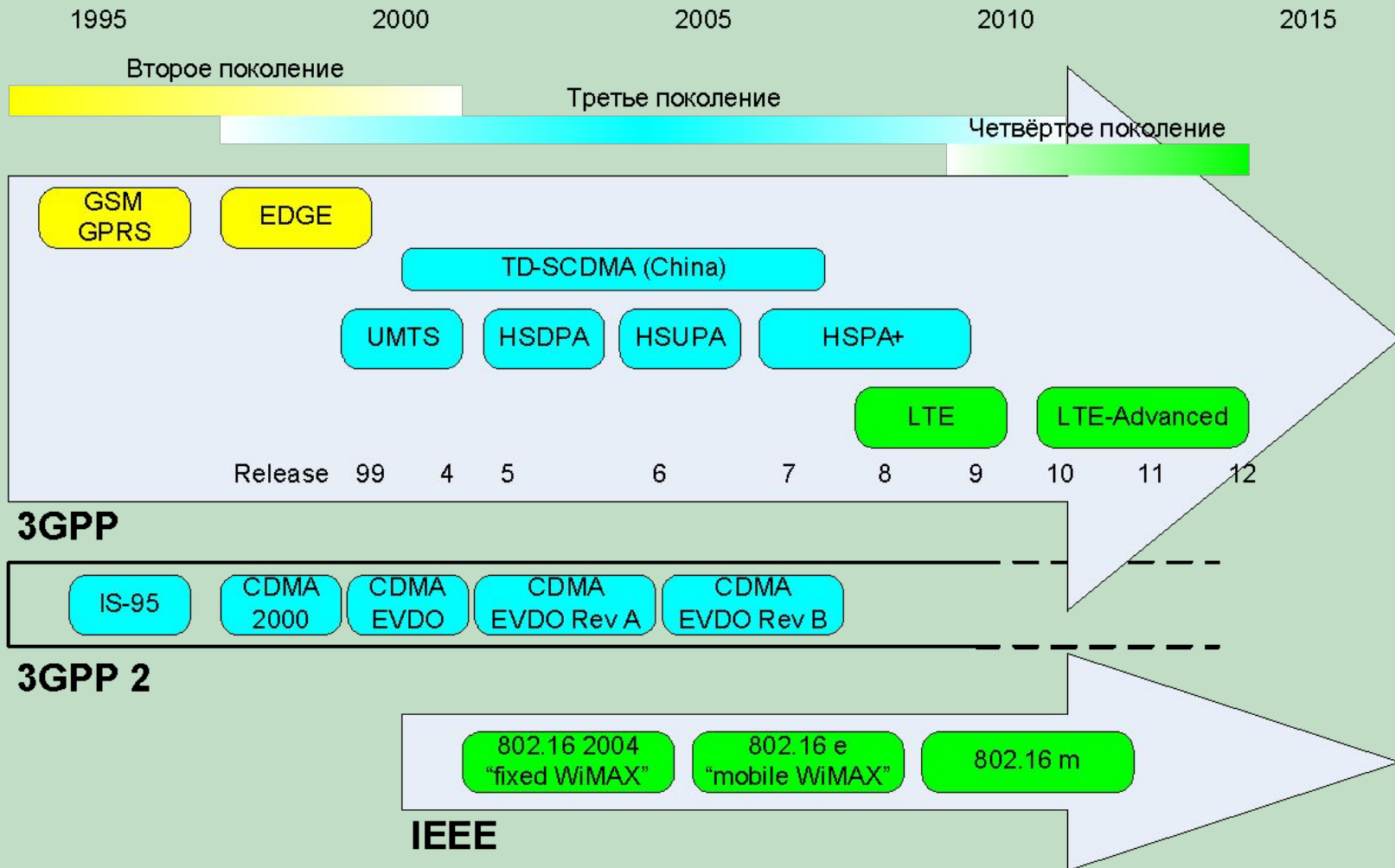
# Формальные требования к 3G и 4G

- **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

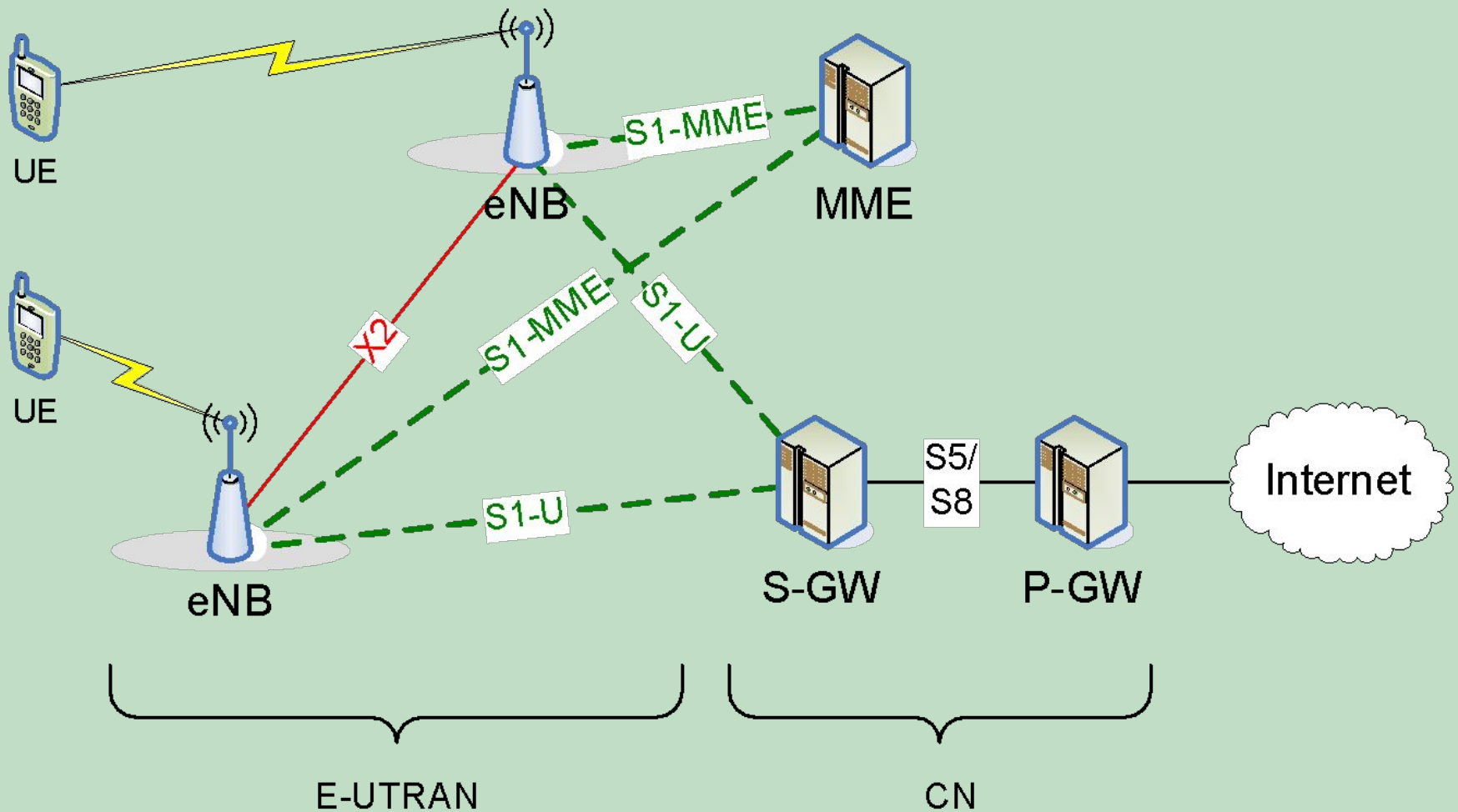
CDMA

OFDMA



## **II. Физический уровень в структуре протоколов LTE**

# Архитектура сети (1/3)



# Архитектура сети (2/3)

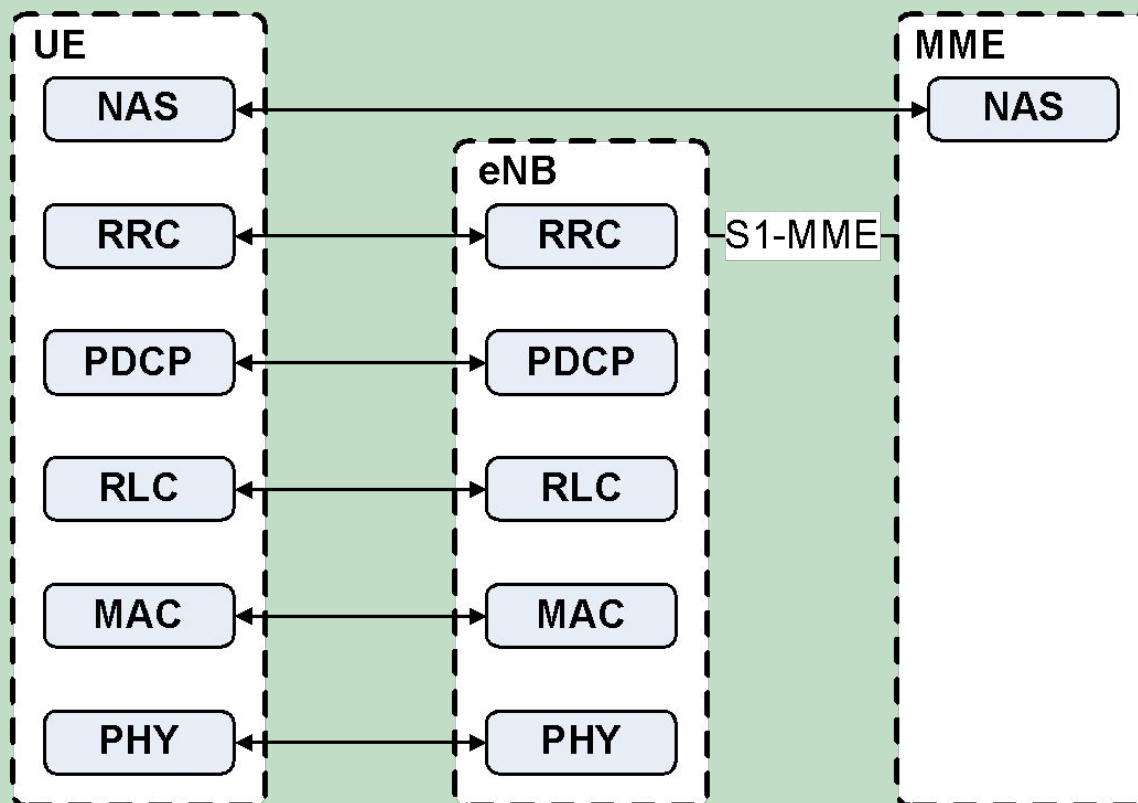
- **eNB** (evolved Node-B) - базовая станция сети радиодоступа E-UTRAN
  - Все функции радиоинтерфейса
    - Управление радиоканалами
    - Управление мобильностью
    - Динамическое распределение физических ресурсов между пользователями
    - И др.
- **MME** (Mobile Management Entity)
  - Установление 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)

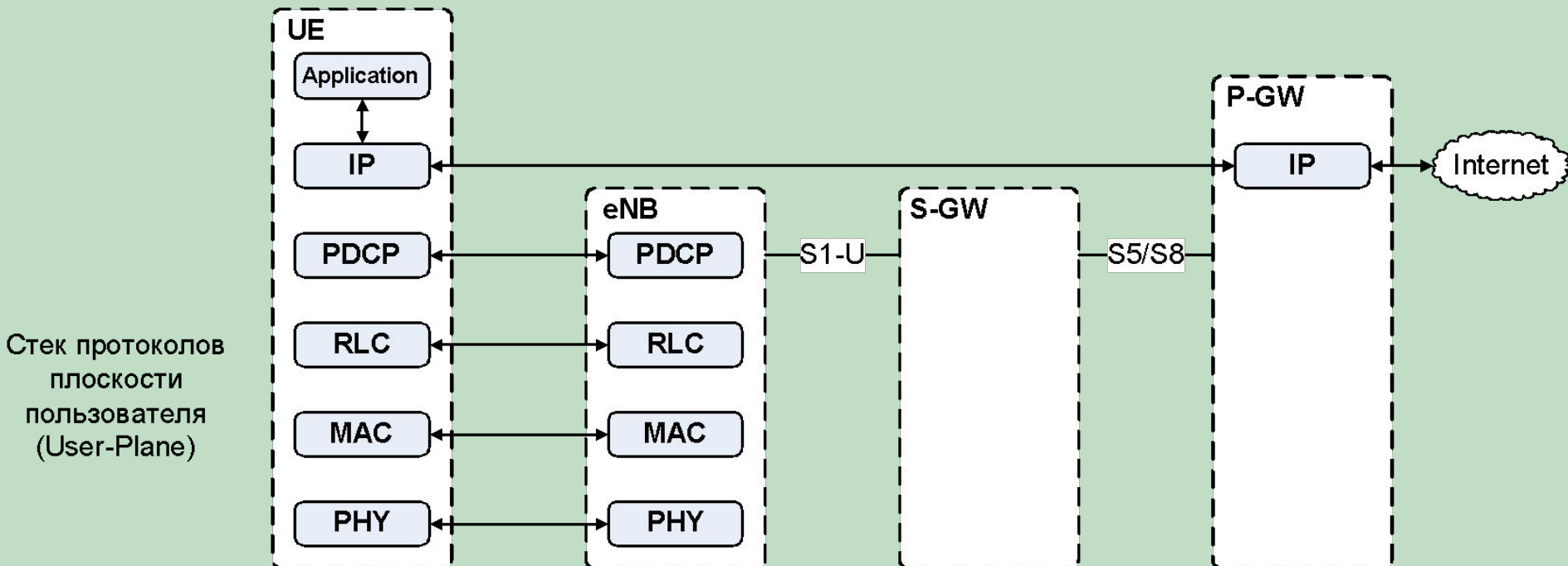
- **PHY** – Physical layer
- **MAC** – Medium Access Control
- **RLC** – Radio Link Control
- **PDCP** – Packet Data Convergence Protocol
- **RRC** – Radio Resource Control
- **NAS** – Non-Access Stratum



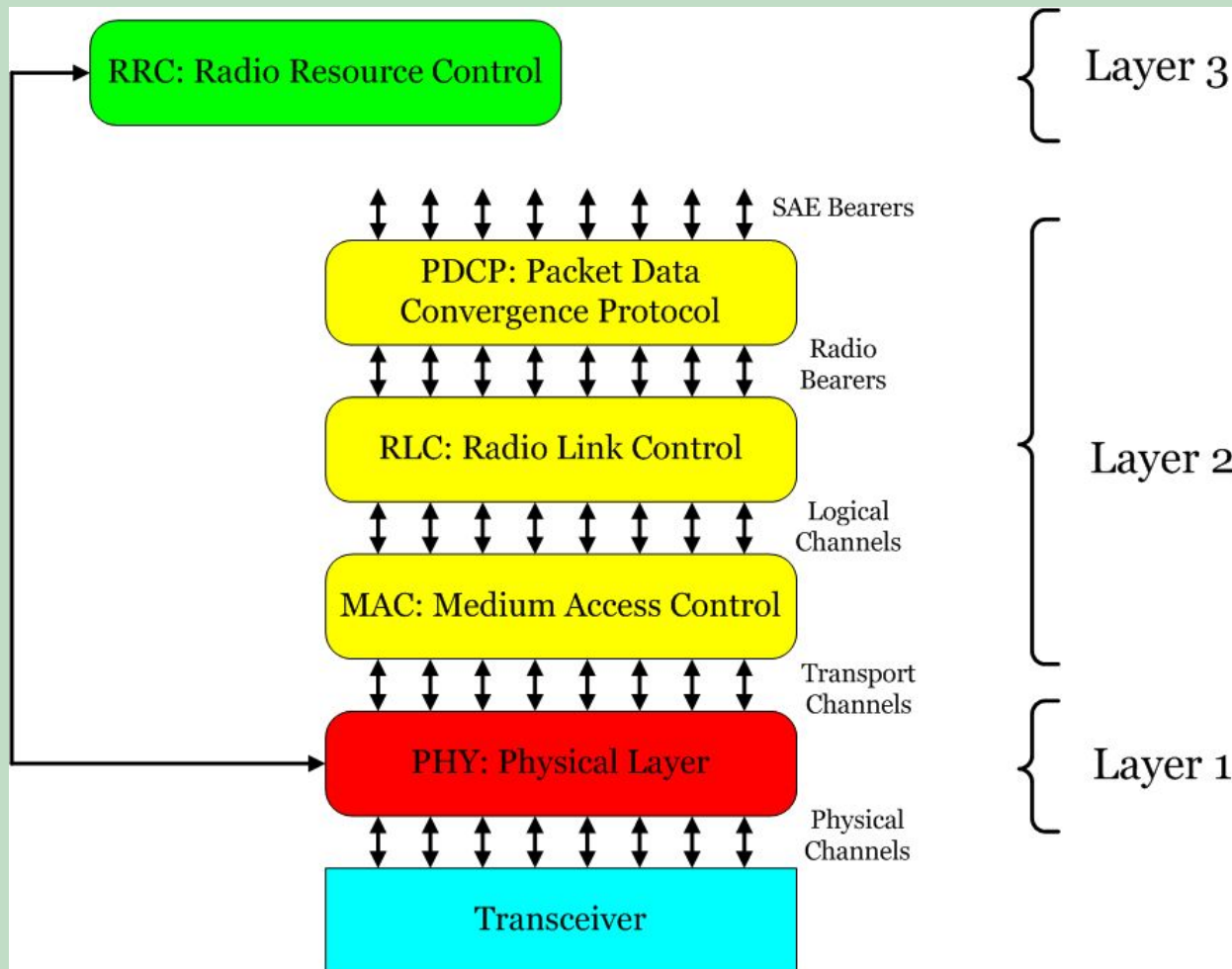
Стек протоколов  
плоскости  
управления  
(Control-Plane)

# Архитектура протоколов LTE (2/3)

IP – Internet Protocol



# 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**

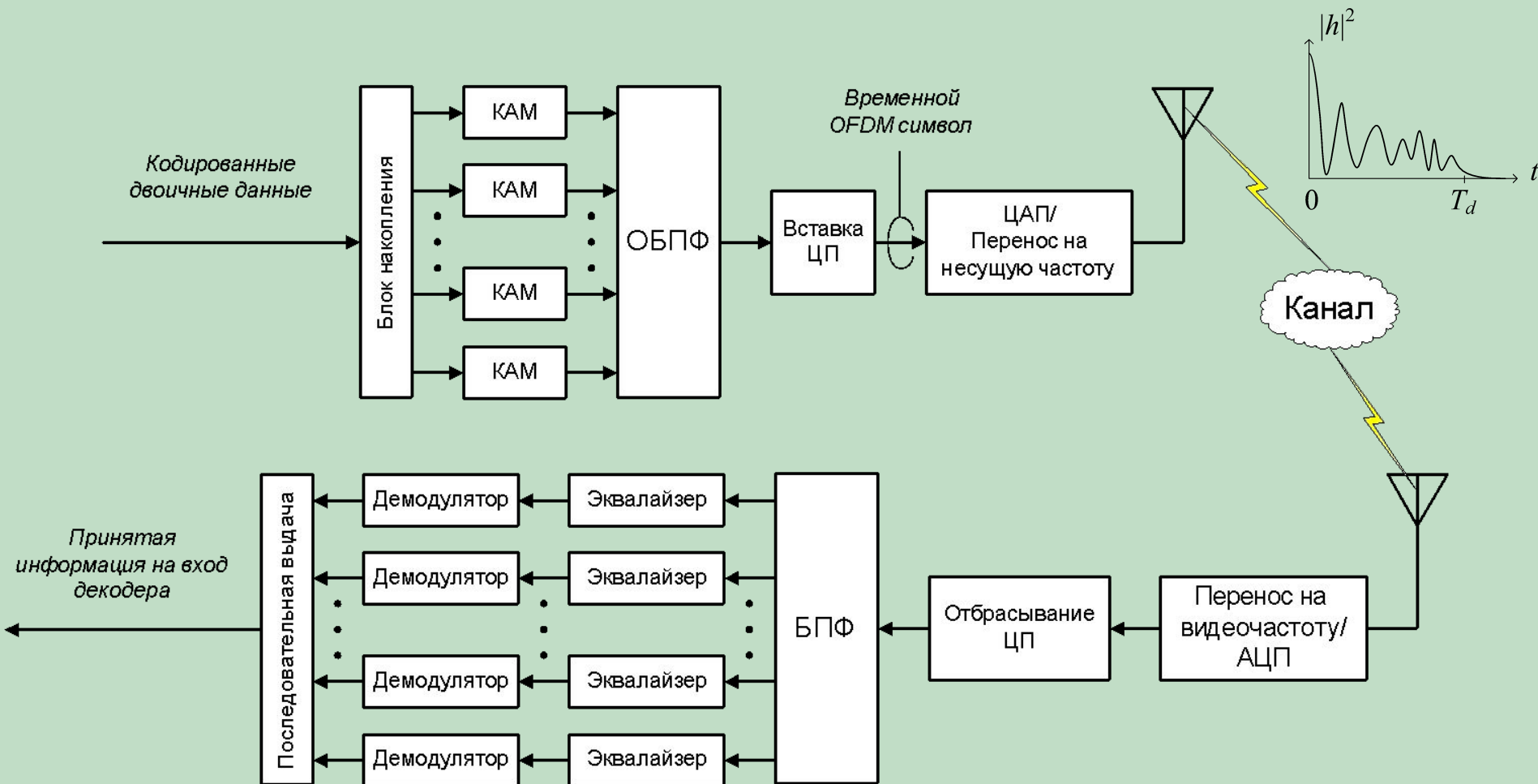
- Обнаружение ошибок транспортных каналов
- Кодирование/ декодирование транспортных каналов
- Согласование скоростей передачи и отображение транспортных каналов в физические каналы
- Модуляция/демодуляция физических каналов
- Частотная и временная синхронизация
- Измерение радиочастотных параметров
- 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



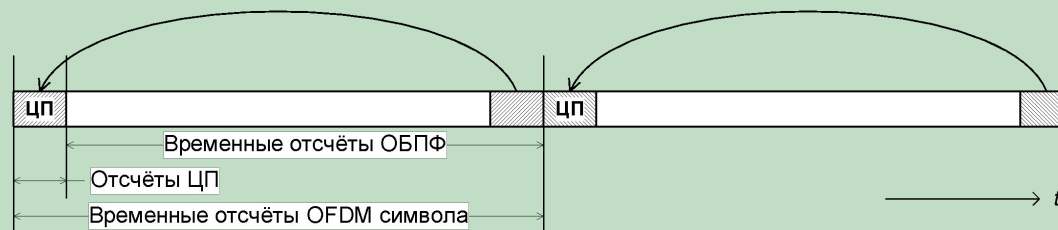
# Математическое описание OFDM

Комплексный символ КАМ      Дискретная частота (поднесущая)      Несущая частота

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

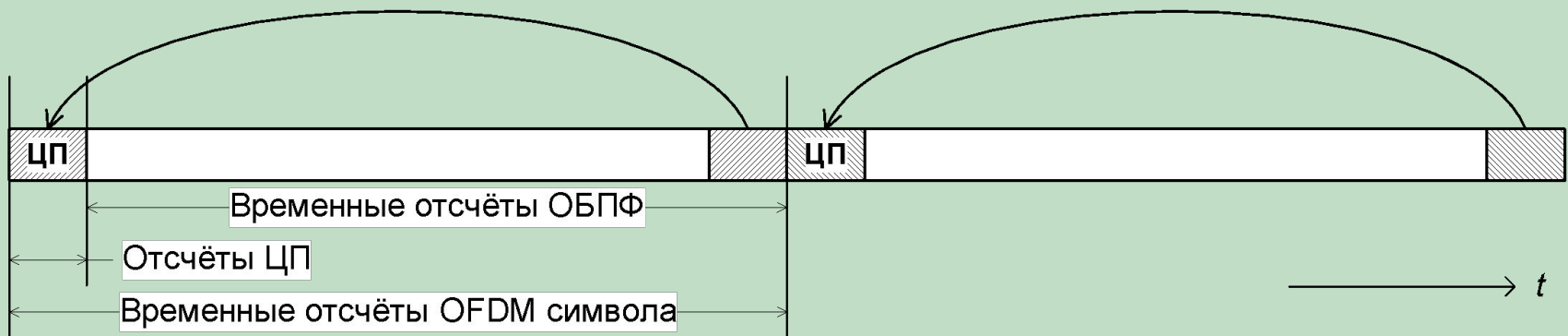
Непрерыв. по времени преобр. Фурье с дискретной частотой

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.)

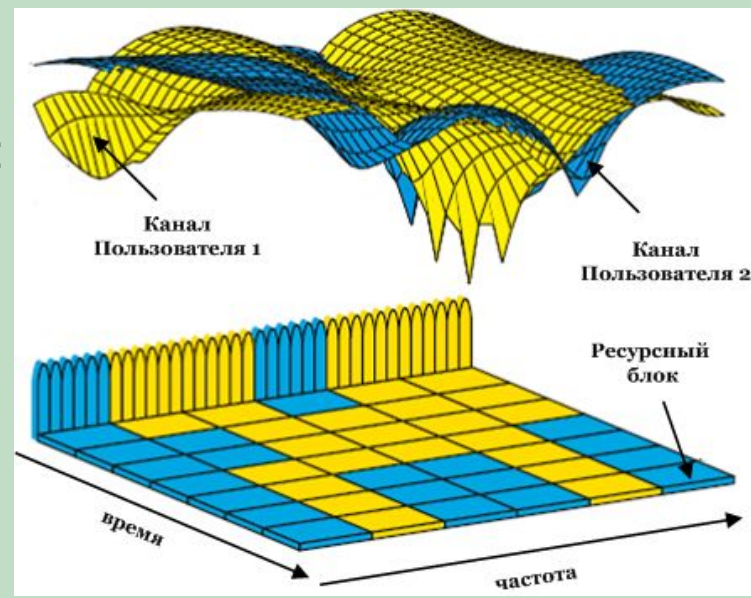
# Длительность OFDM символа в LTE

- 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

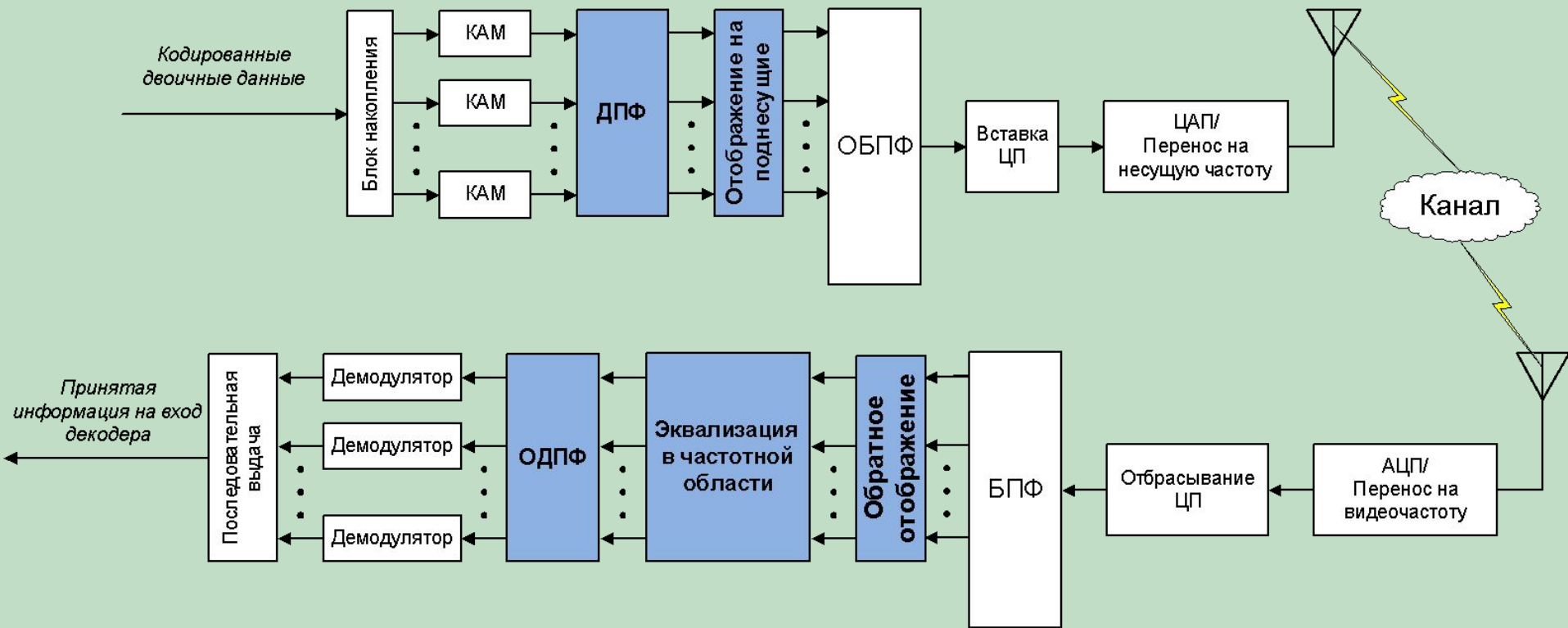
- Технология OFDM позволяет оперировать частотным ресурсом на уровне узких полос (поднесущих)
  - При наличии обратной связи от приемника к передатчику можно выделить «плохие» и «хорошие» поднесущие; скорости передачи при использовании только «хороших» поднесущих повышается (выигрыш за счет выбора поднесущих)
  - 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)



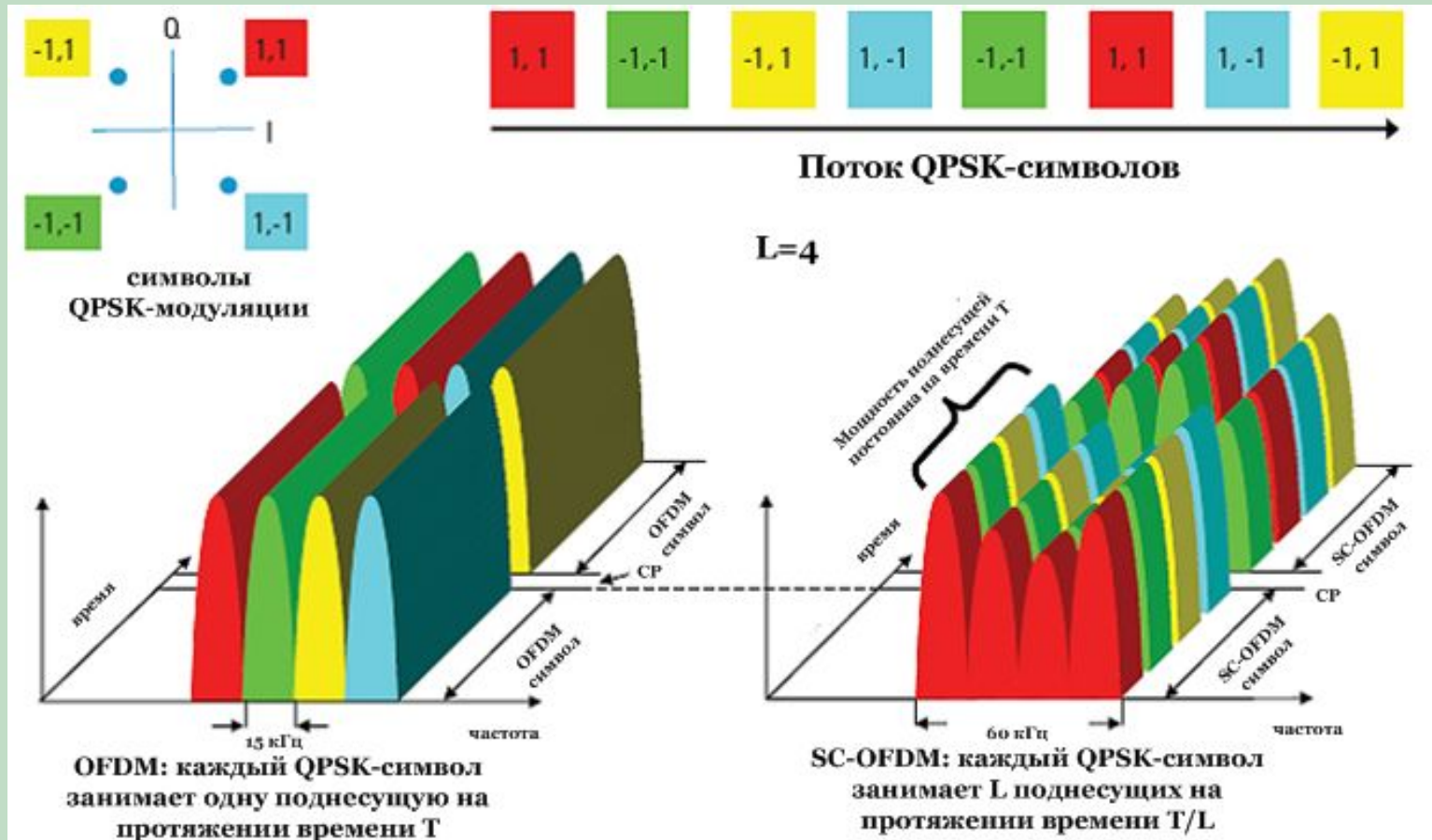
# SC-FDMA

- 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



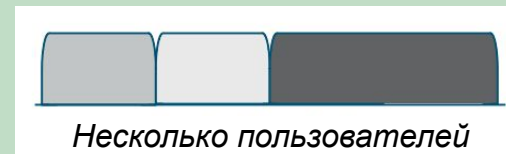
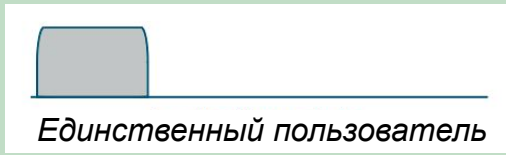
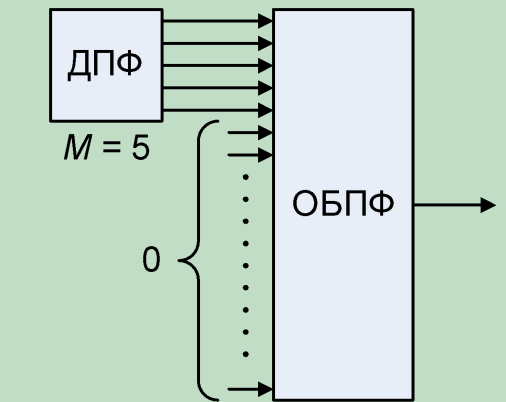
# Иллюстрация схем цифровой модуляции OFDM и SC-FDMA



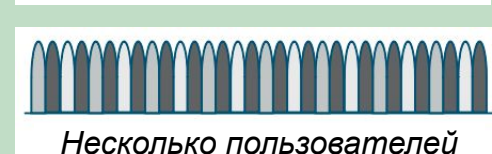
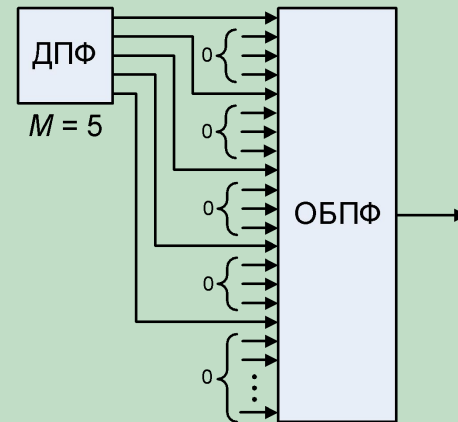
# Отображение на поднесущие

- 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

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

Распределённое отображение на поднесущие

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

Локализованное отображение на поднесущие

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

- \_\_\_\_\_→  $t$
- 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

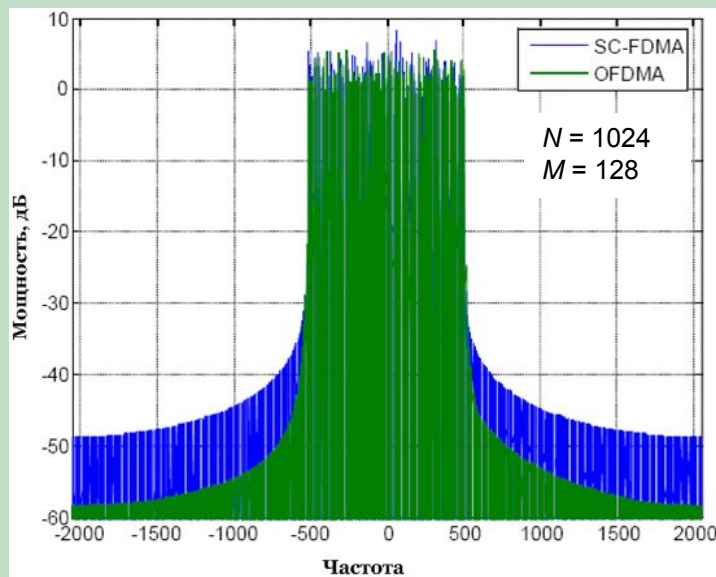
$$PAPR = \frac{\max_{n=0,1,\dots,N-1} |\tilde{x}_n|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |\tilde{x}_n|^2}$$

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

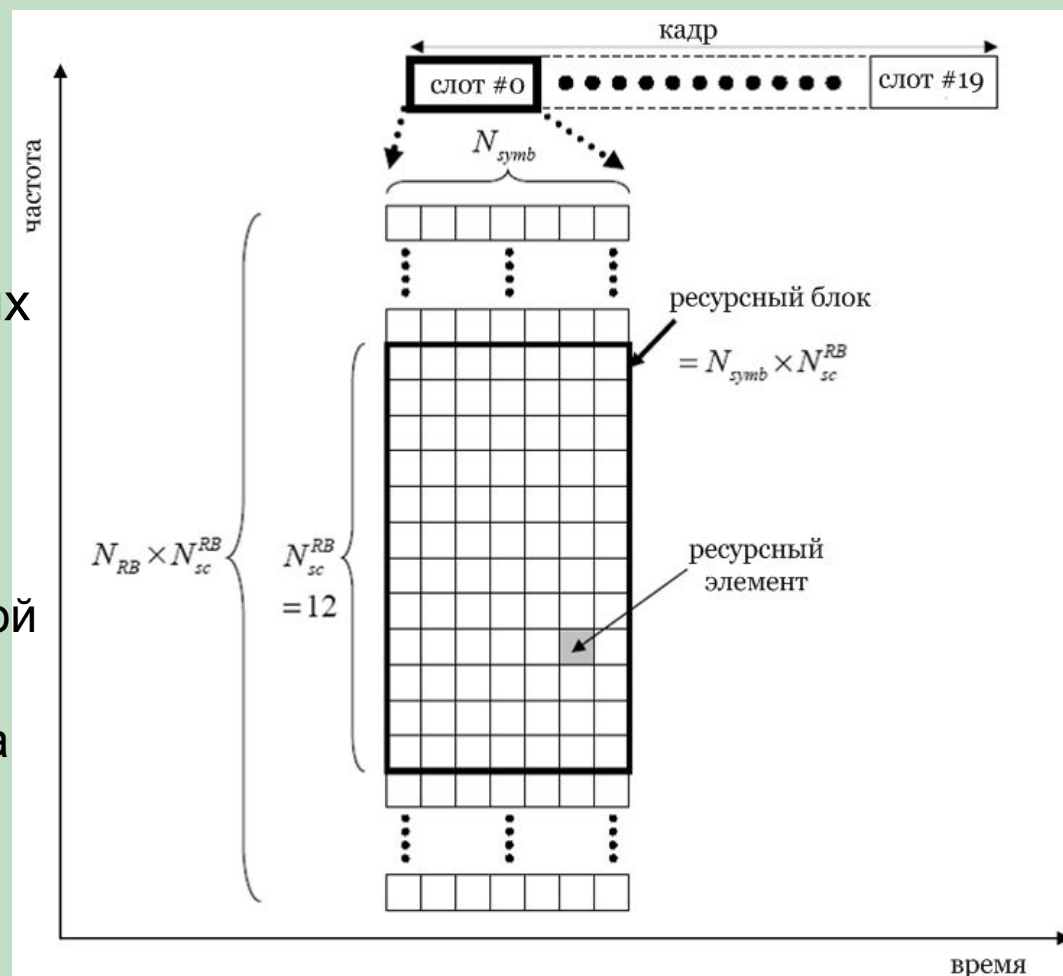
# SC-FDMA в сравнении с OFDM

- 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

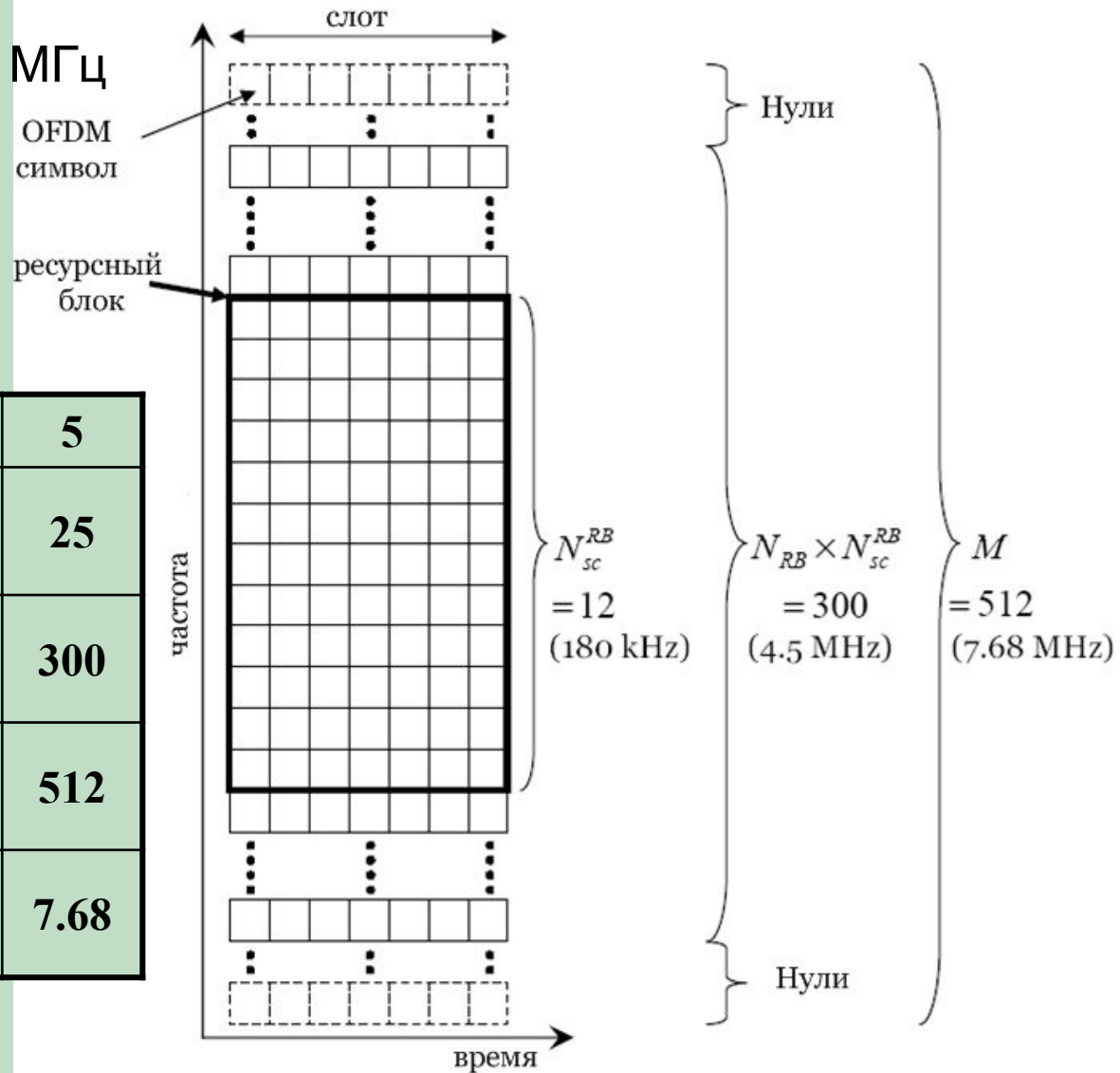
Полоса частот, МГц	1.4	3	5	10	15	20
Количество доступных ресурсных блоков	6	15	25	50	75	100
Количество используемых поднесущих	72	180	300	600	900	1200
Количество точек Фурье-преобразования	128	256	512	1024	1536	2048
Частота дискретизации, МГц	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72



# Ресурс и полоса частот (2/2)

- Пример для полосы 5 МГц

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

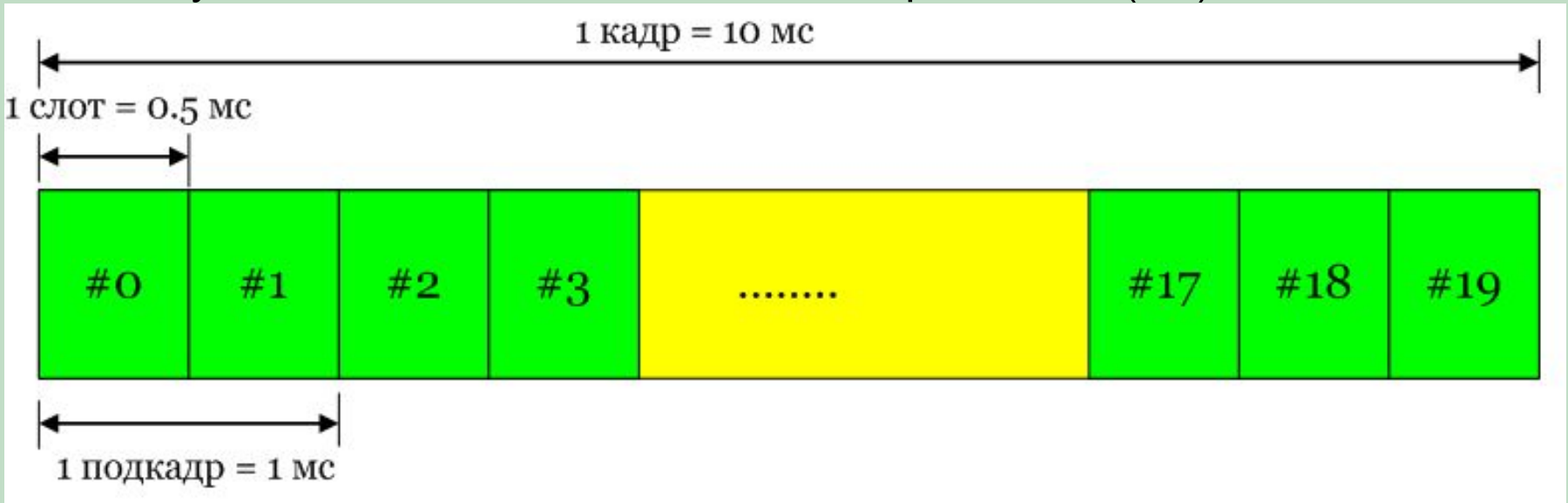


# LTE кадр

- 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

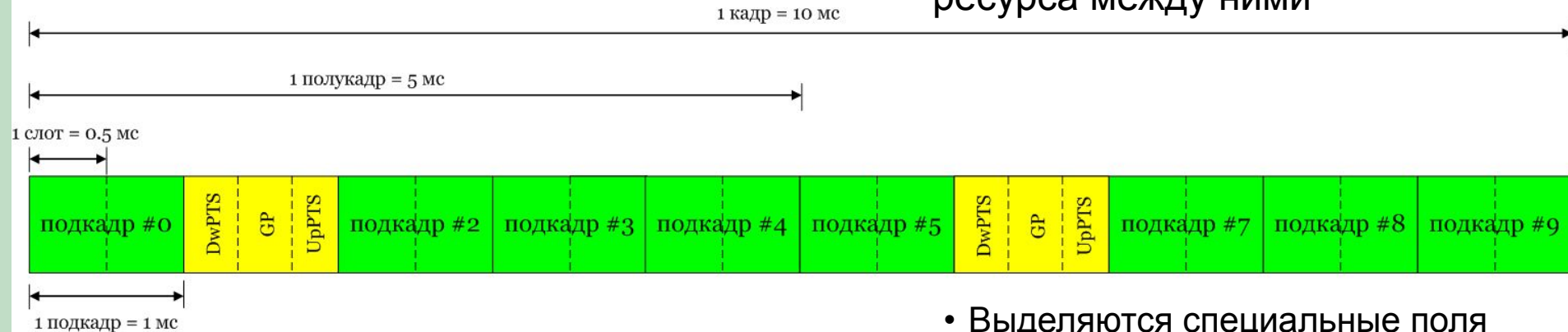
# FS1. Структура кадра для FDD

- 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

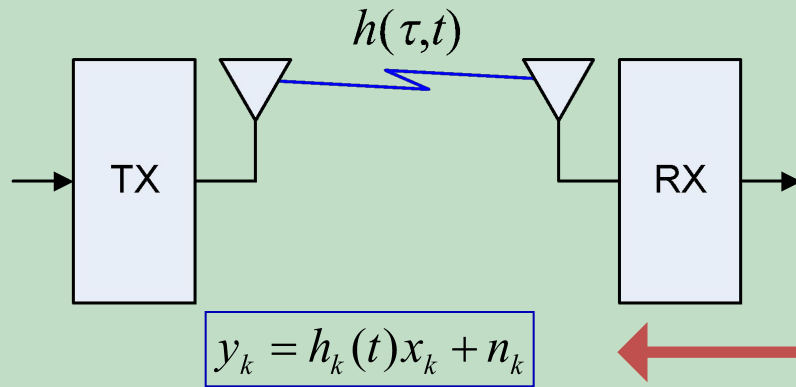
- Развертывание системы возможно как при выделении парных (FDD), так и непарных частотных диапазонов (TDD)
  - Режим частотного дуплексирования (FDD, Frequency Division Duplex): downlink и uplink разнесены по частоте
  - Режим временного дуплексирования (TDD, Time Division Duplex): downlink и uplink 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

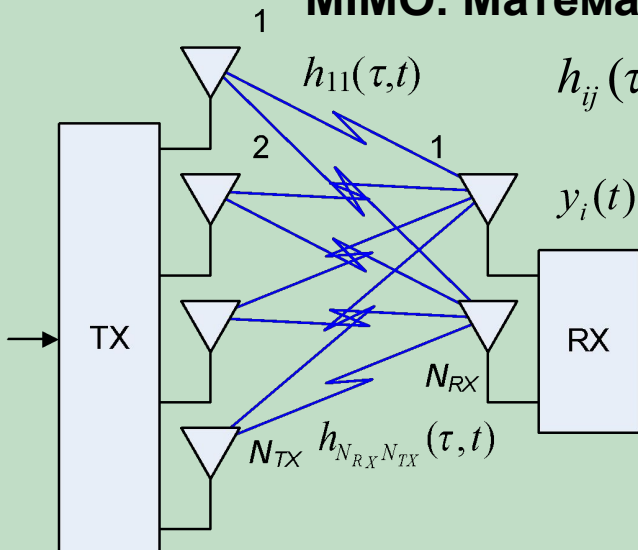
## SISO. Математическая модель принятого сигнала



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

Если длительность ЦП больше макс. времени задержки канала  $\tau_{\max}$ , 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

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

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

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

$$ОСШ_{SISO} \propto |h|^2$$

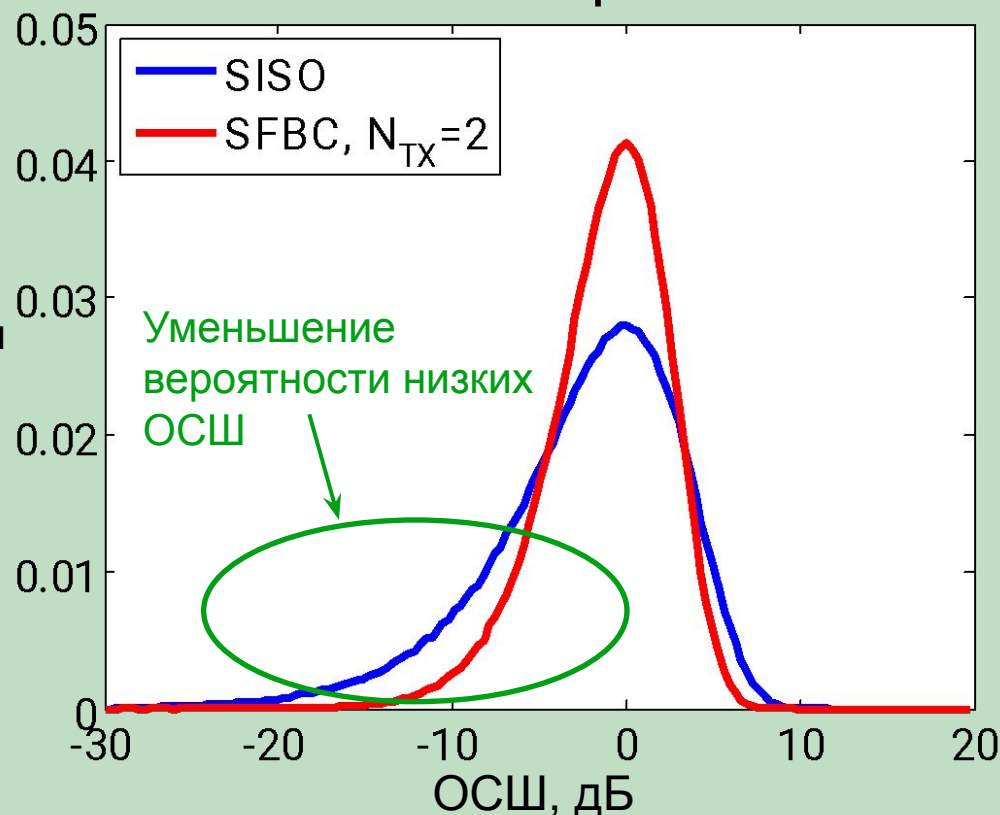
SFBC (схема Аламоути):

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

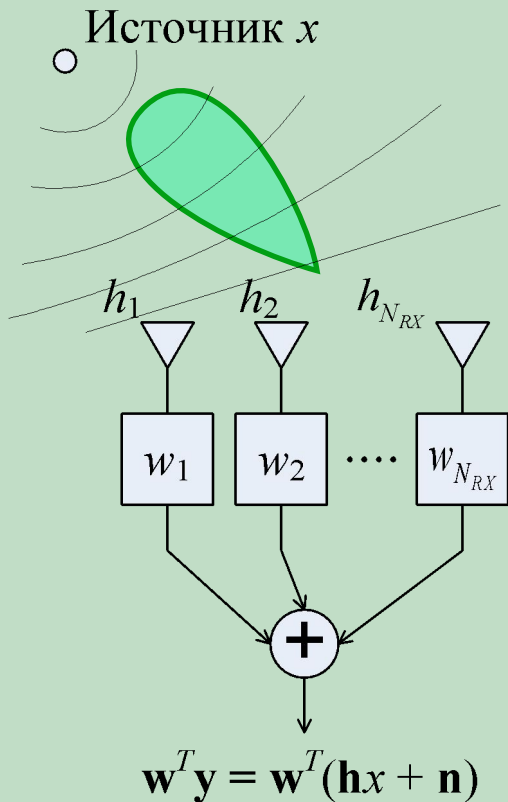
$$ОСШ_{SFBC} \propto |h_1|^2 + |h_2|^2$$

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

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

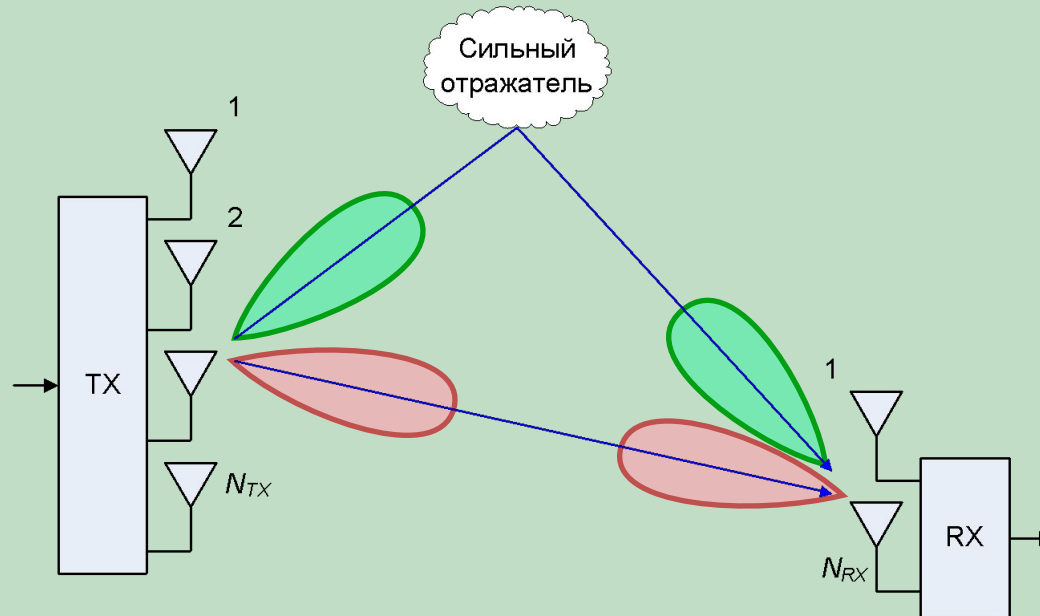
$$\mathbf{x} = \mathbf{w}s = \mathbf{h}^* s$$

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

$\mathbf{w}$  – 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

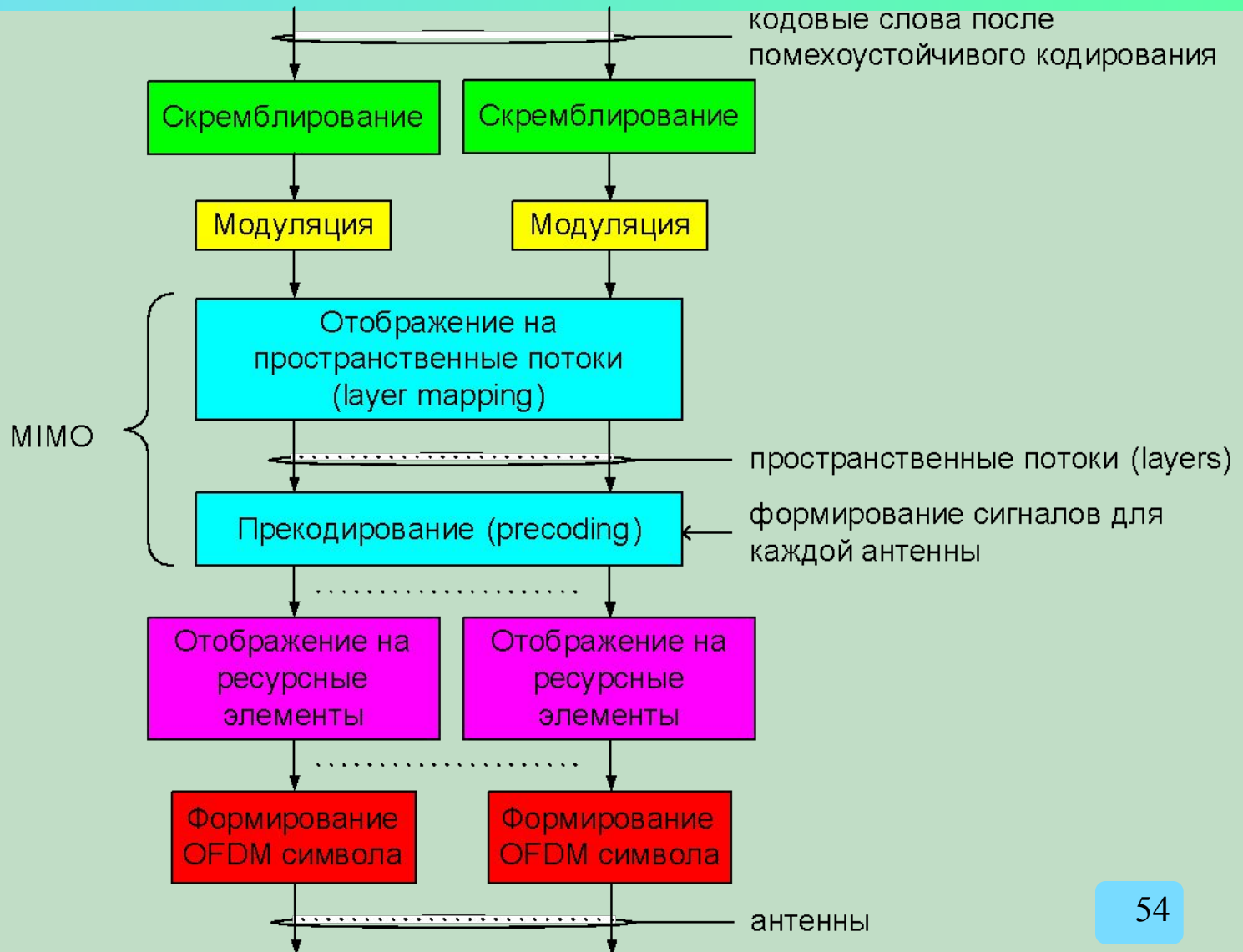


## **IV. Передача сигналов от базовой станции к пользователю (Downlink, DL)**

# 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

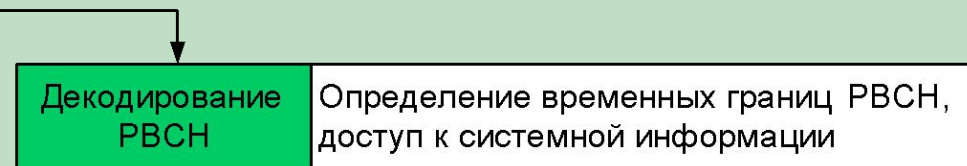
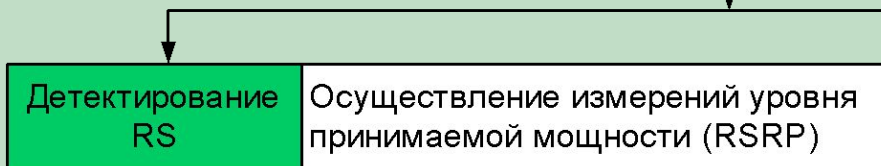
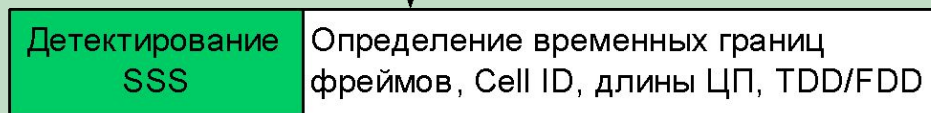
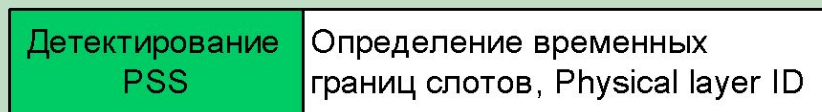


# Каналы: сигналы и модуляция

<b>Канал</b>	<b>Схема модуляции</b>
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
<b>Физический сигнал</b>	<b>Схема модуляции</b>
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

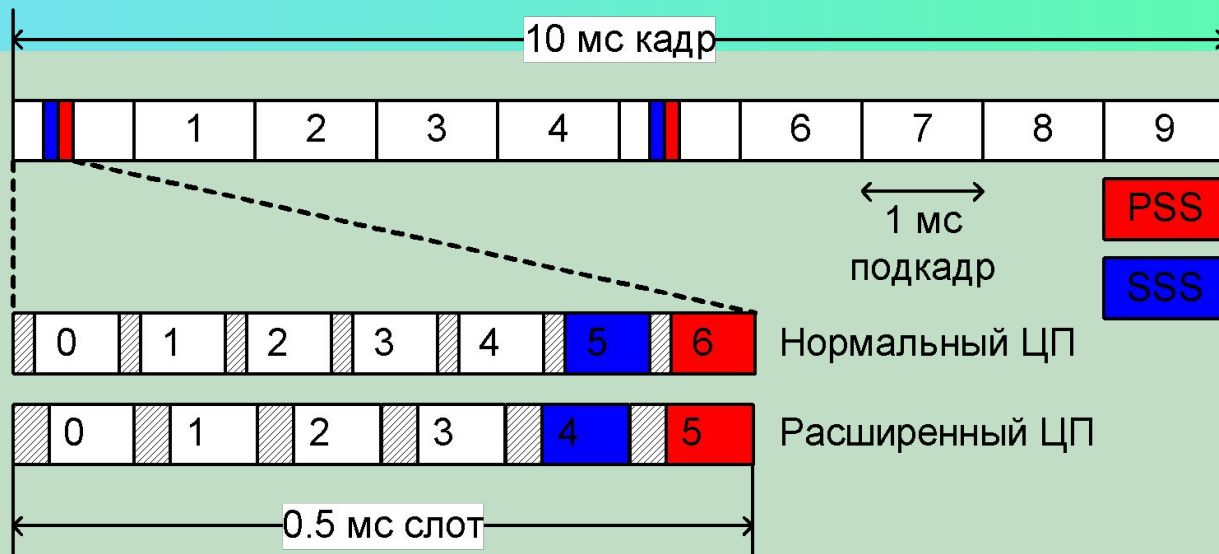
- Осуществляется при помощи детектирования двух служебных последовательностей: PSS и SSS



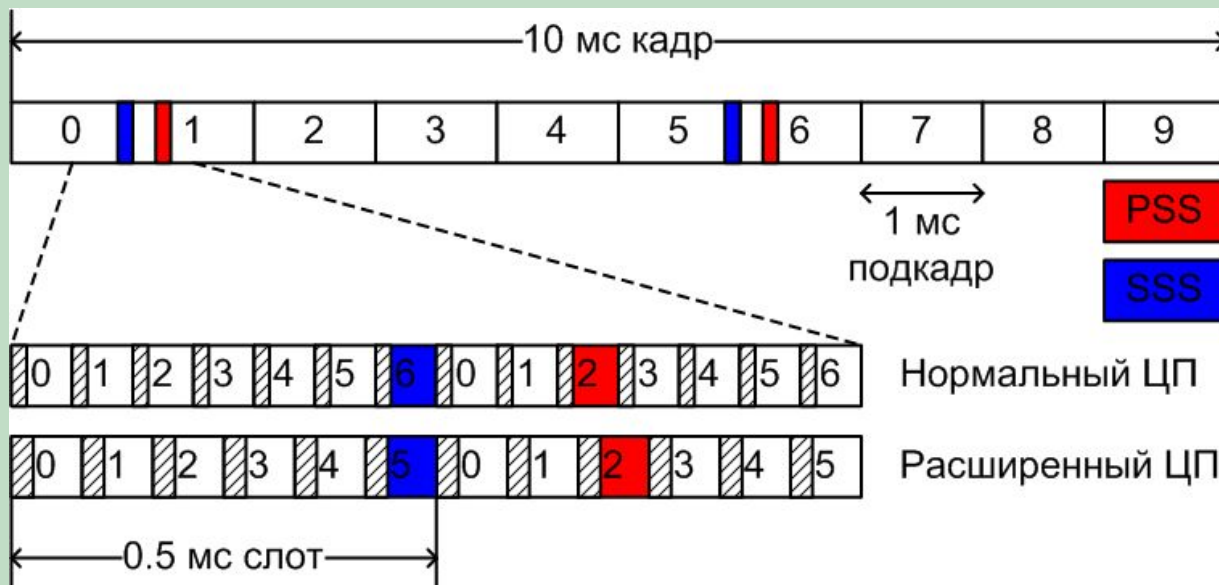


# PSS, SSS во временной области

FDD

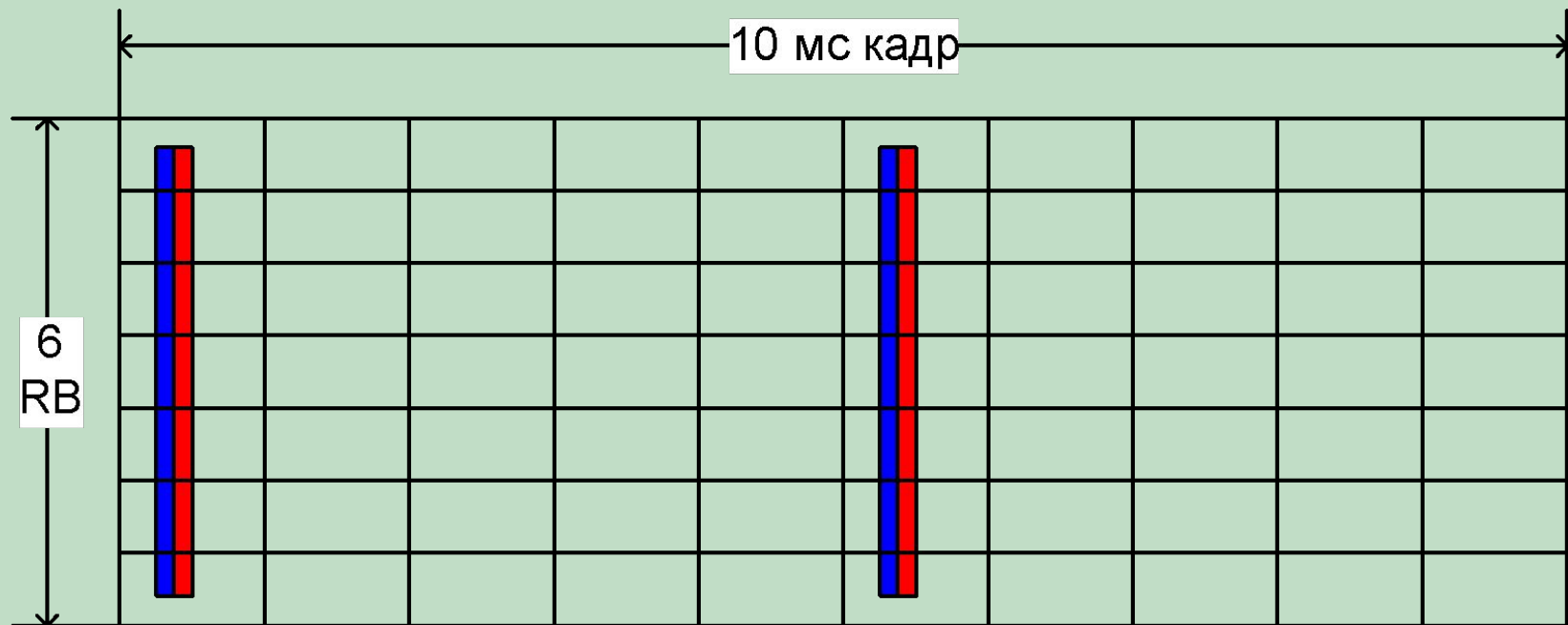


TDD



# PSS, SSS в частотной области

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



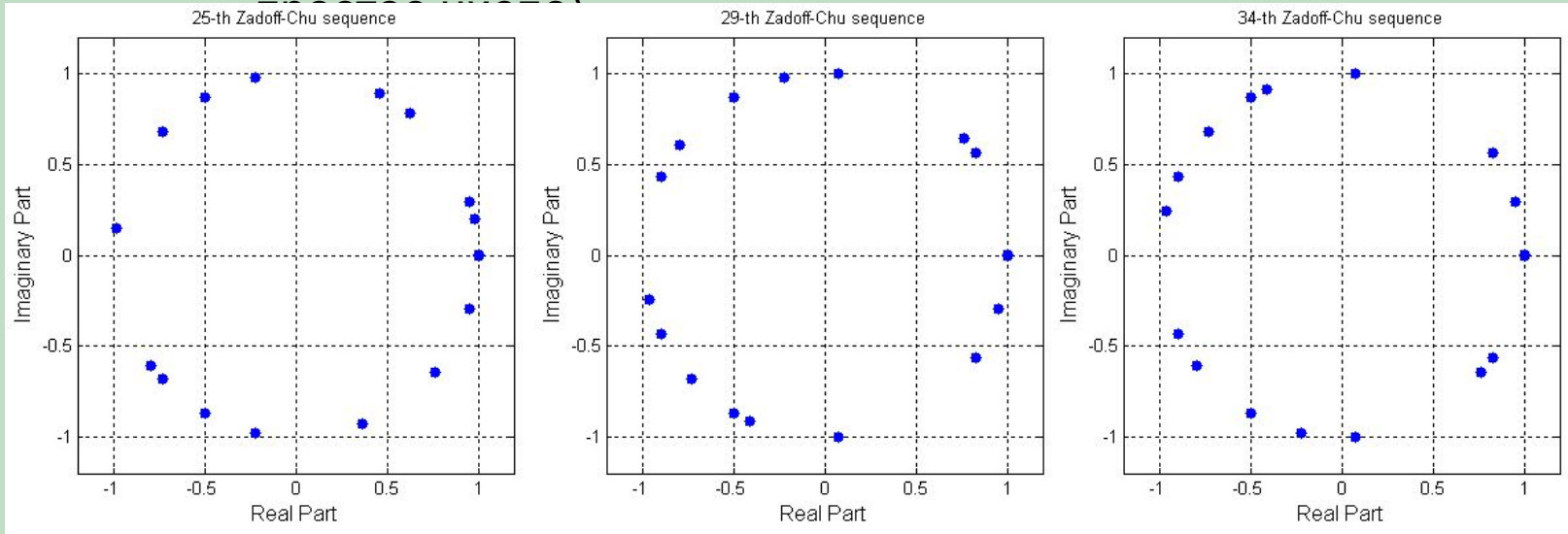
# Последовательности Задова-Чу

- 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**

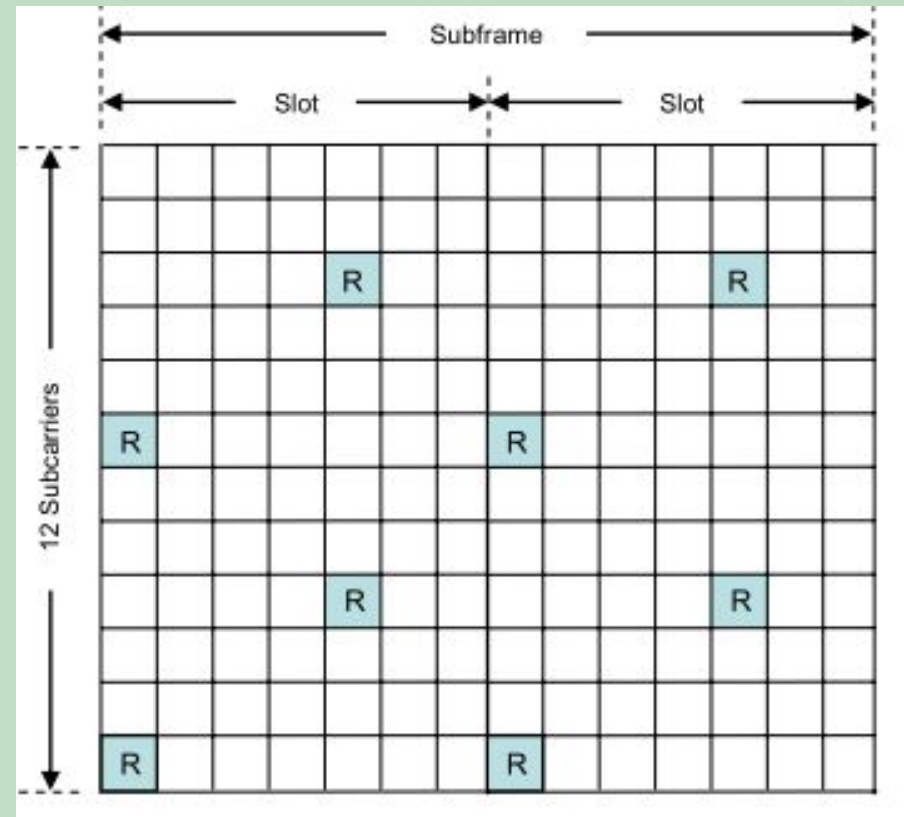
# Опорные (пилотные) сигналы

- 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

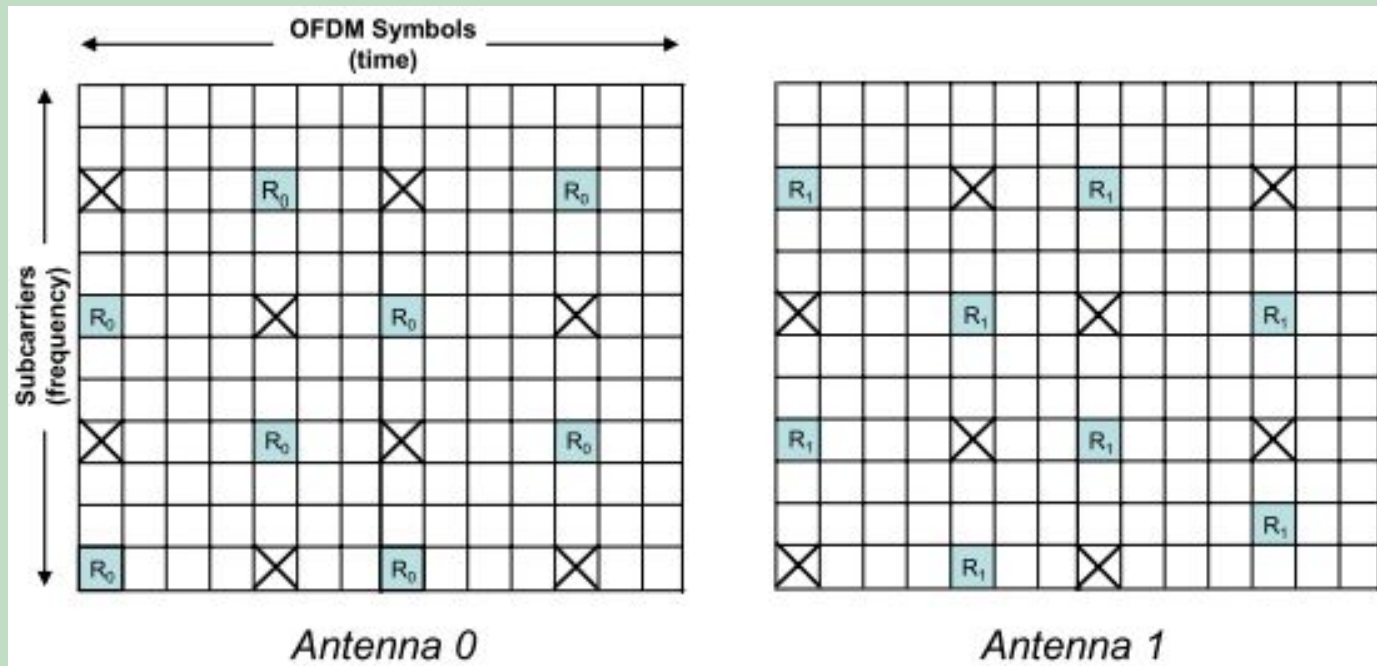
- В downlink пилотные сигналы передаются на:
  - 1-ой и 7-ой поднесущих 1-го OFDM-символа,
  - 4-ой и 10-ой поднесущих 5-го OFDM-символа
- Коэффициент передачи канала измеряется на пилотных поднесущих
- Для определения коэффициента передачи на остальных поднесущих используется процедура интерполяции

## 1. Одна передающая антенна на базовой станции



# Распределение пилотных поднесущих по ресурсному блоку

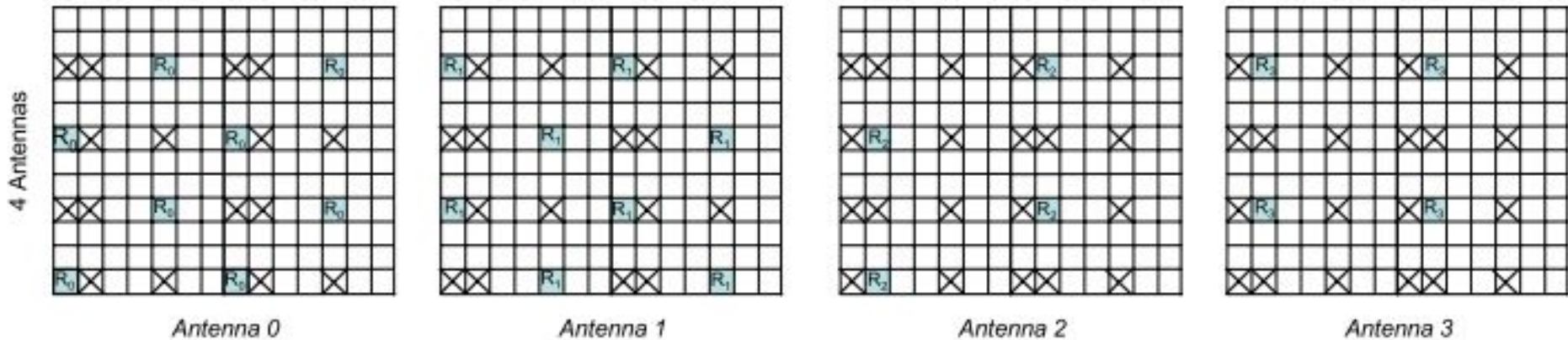
## 2. Две передающие антенны на базовой станции



- $R_0$  – 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:

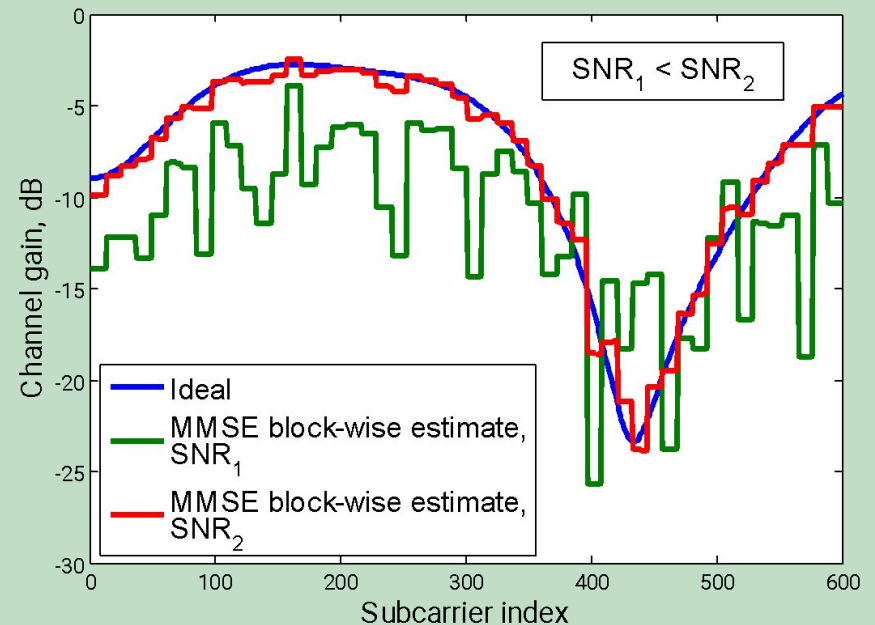
$$\hat{h}_j^{LS} = p_j^* y_j = h_j + p_j^* n_j = h_j + \tilde{n}_j$$

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

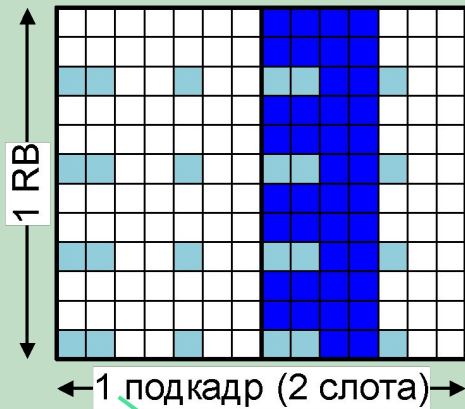




# РВСН. Общая информация

- 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

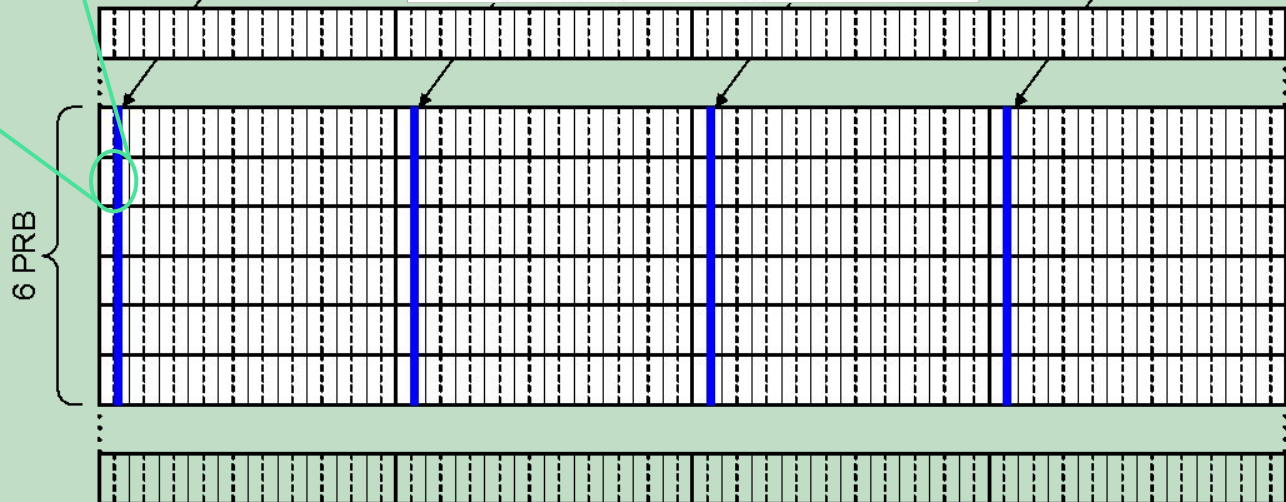
CRC Добавление 16 проверочных бит

Помехоустойчивое свёрточное кодирование, скремблирование, QPSK модуляция, пространственная обработка

Сегментация на 4 одинаковых блока, достаточных для декодирования РВСН



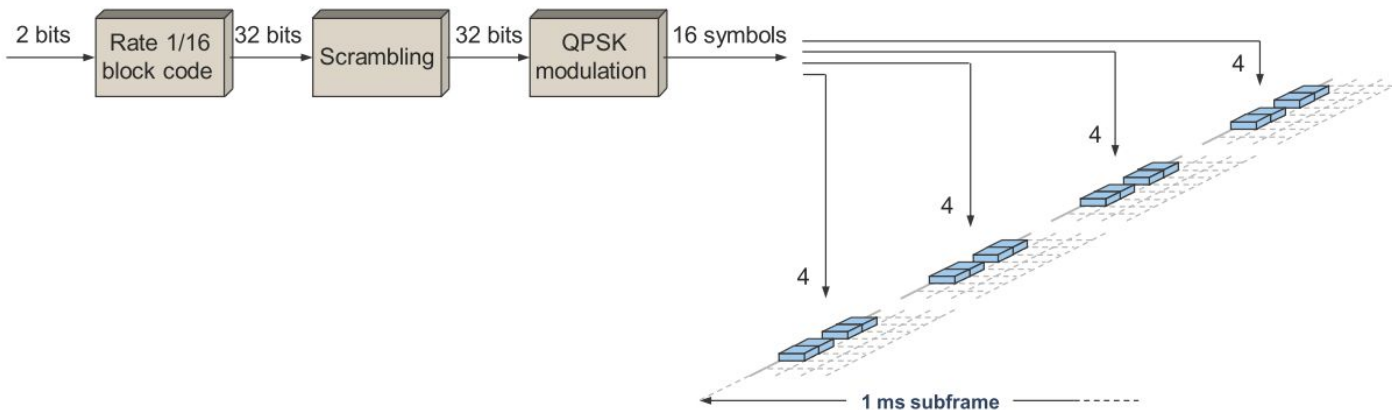
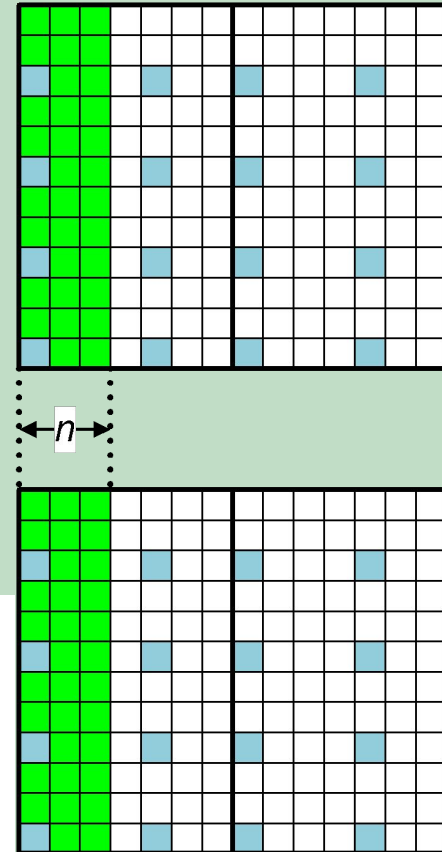
40 мс (4 кадра) – периодичность РВСН



один кадр

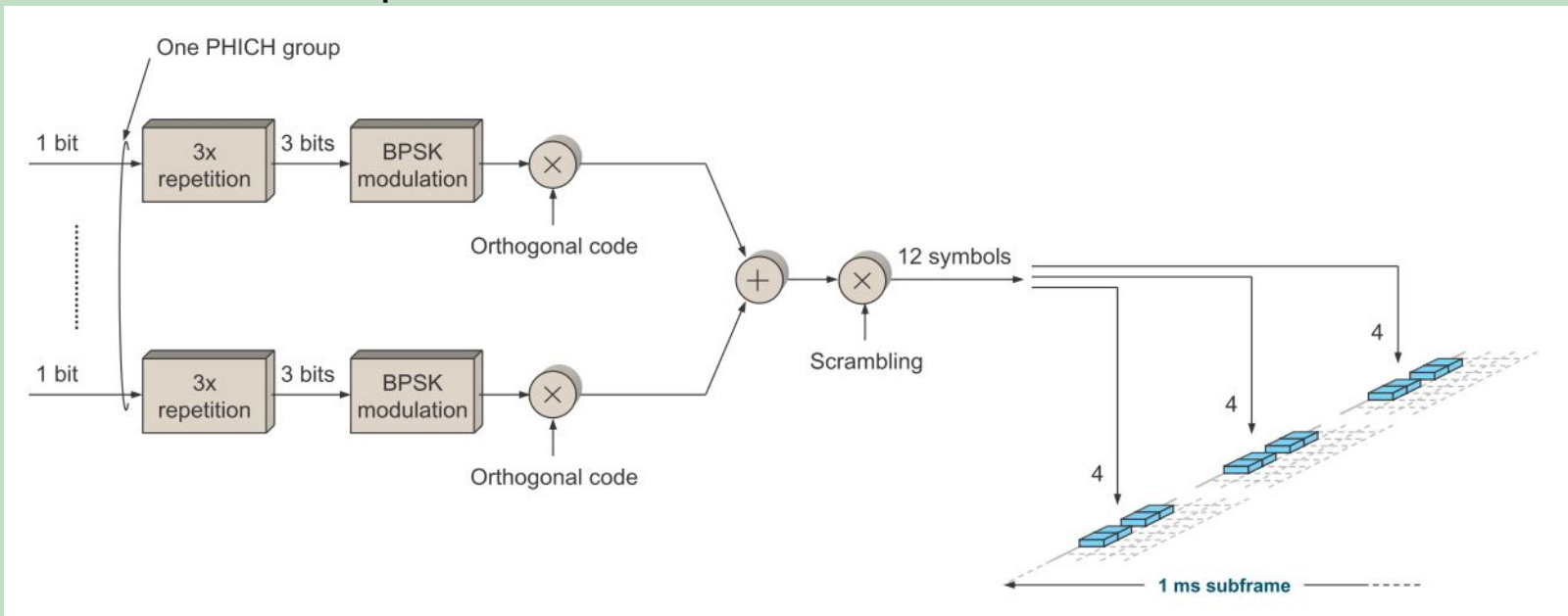
# Каналы управления: РСFICH

- 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

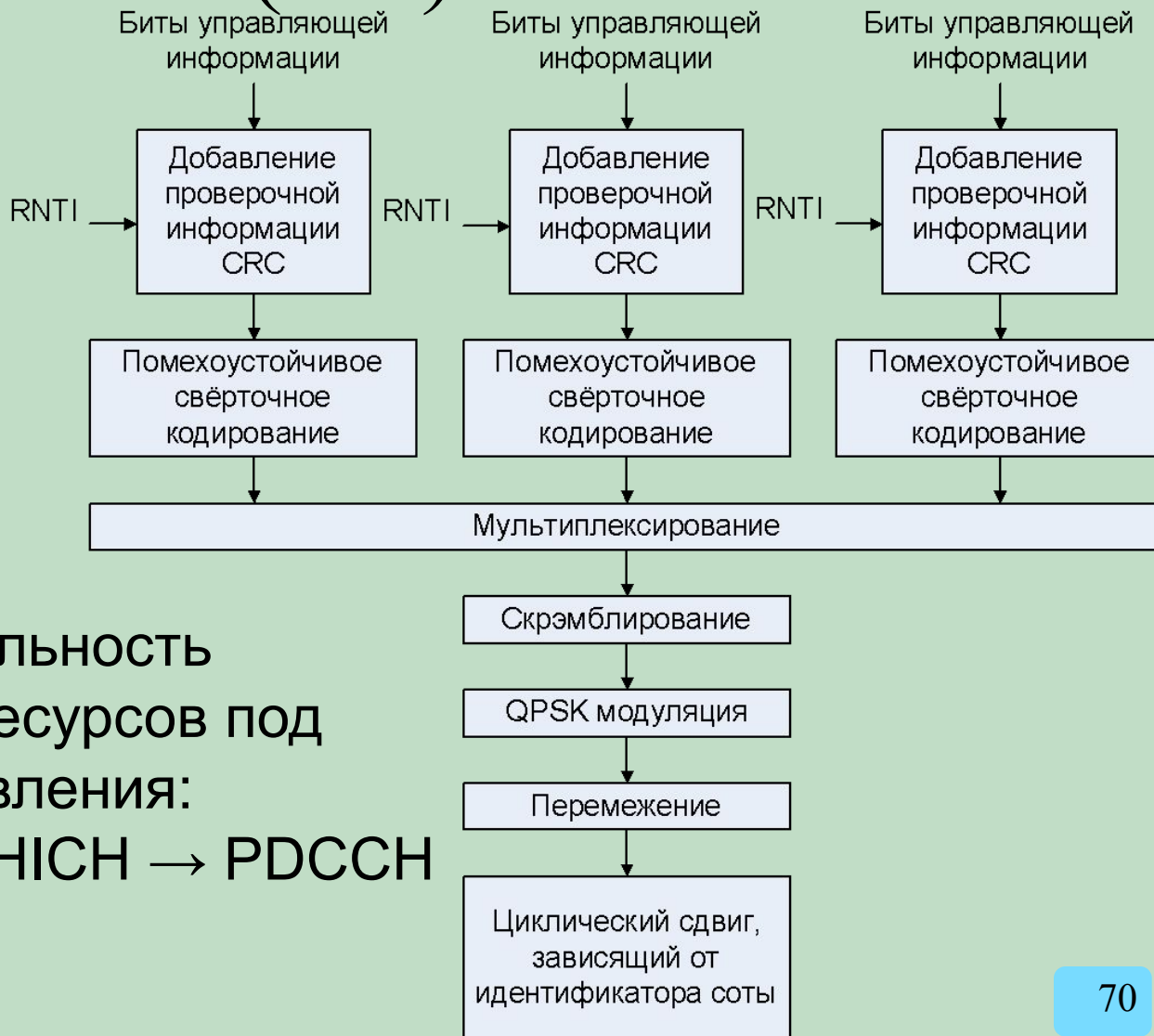


# Каналы управления: PDCCH (1/2)

- 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

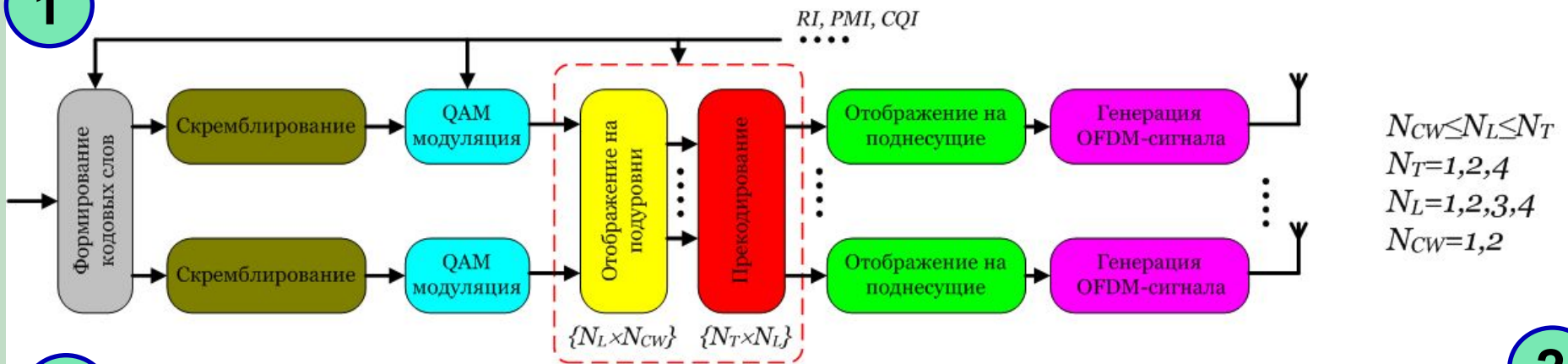
- Применяется только для канала данных (PDSCH)
  - Опорные сигналы и сигналы синхронизации также не охватываются
- Требуется обратной связи от абонента
  - Closed-loop: индекс матрицы прекодирования (**PMI**, Precoding Matrix Indicator), информация о качестве канала связи (**CQI**, Channel Quality Information), 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

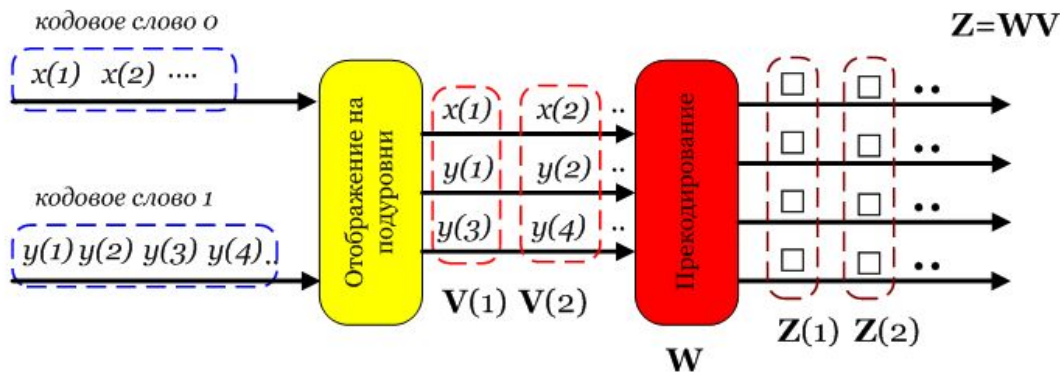
# Пример пространственного мультиплексирования Closed-loop

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	$v_1(i) = x(i)$ $v_2(i) = y(i)$

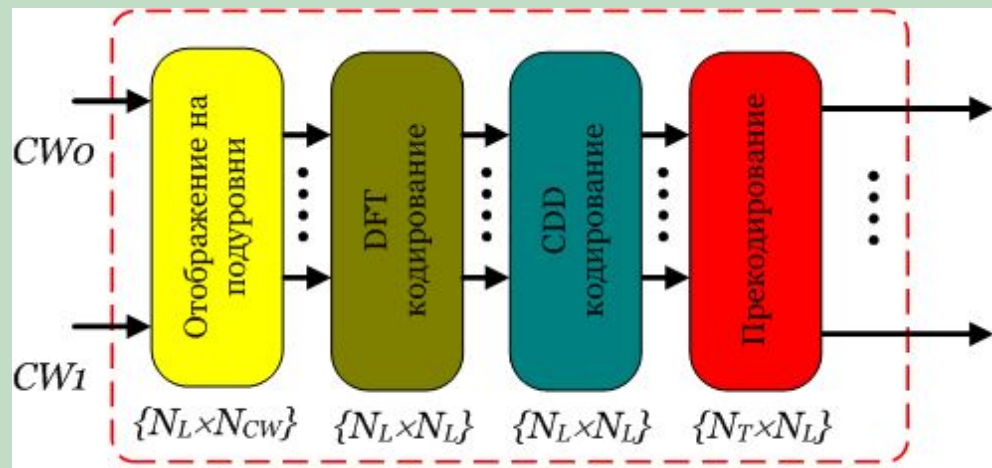
# Пространственное мультиплексирование Open-loop

- 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

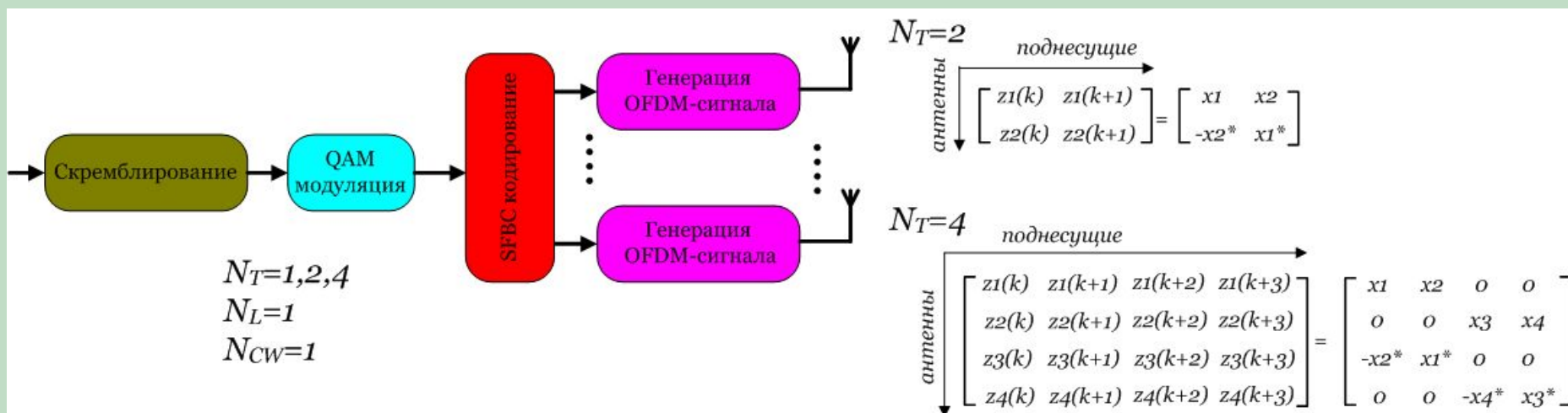
$$\mathbf{U} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{-j2\pi/3} & e^{-j4\pi/3} \\ 1 & e^{-j4\pi/3} & e^{-j8\pi/3} \end{bmatrix}$$

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

Пример для  $N_L=3$

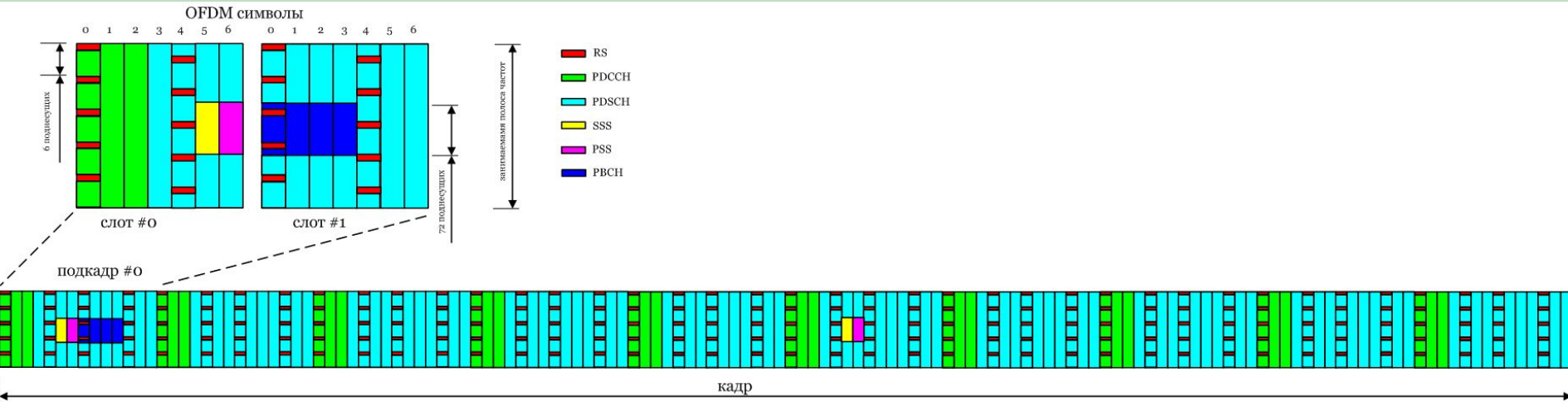
# Разнесённая передача (TxD)

- 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)

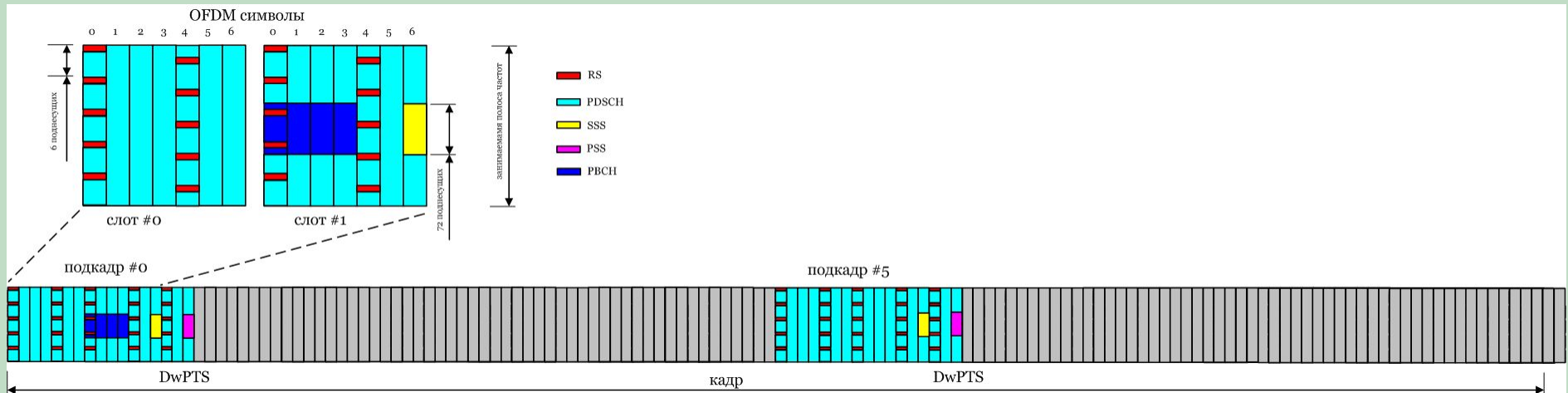


# Каналы downlink

- Режим FDD



- Режим TDD





**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

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

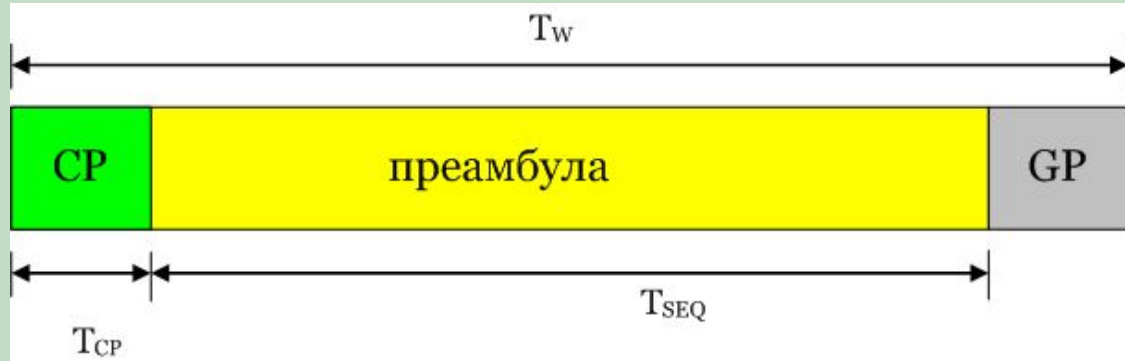
# Процедура случайного доступа

- 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 ширококвещательных блоках системной информации
  - Все пользователи могут равновероятно начать процедуру соединения
- Преамбула формируется из последовательности Задов-Чу
  - Индекс базовой последовательности транслируется абонентам в ширококвещательных 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



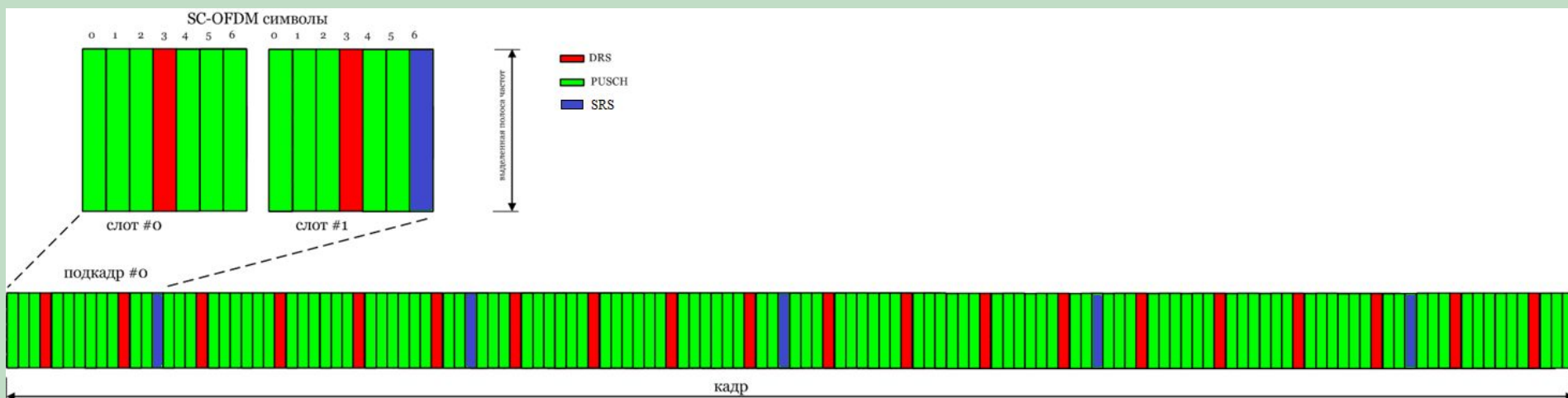
Формат	$T_{CP}$ , мкс	$T_{SEQ}$ , мкс	$T_w$ , мкс
0	103	800	1000
1	684	800	2000
2	203	1600	2000
3	684	1600	3000
4	14.6	133	-



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

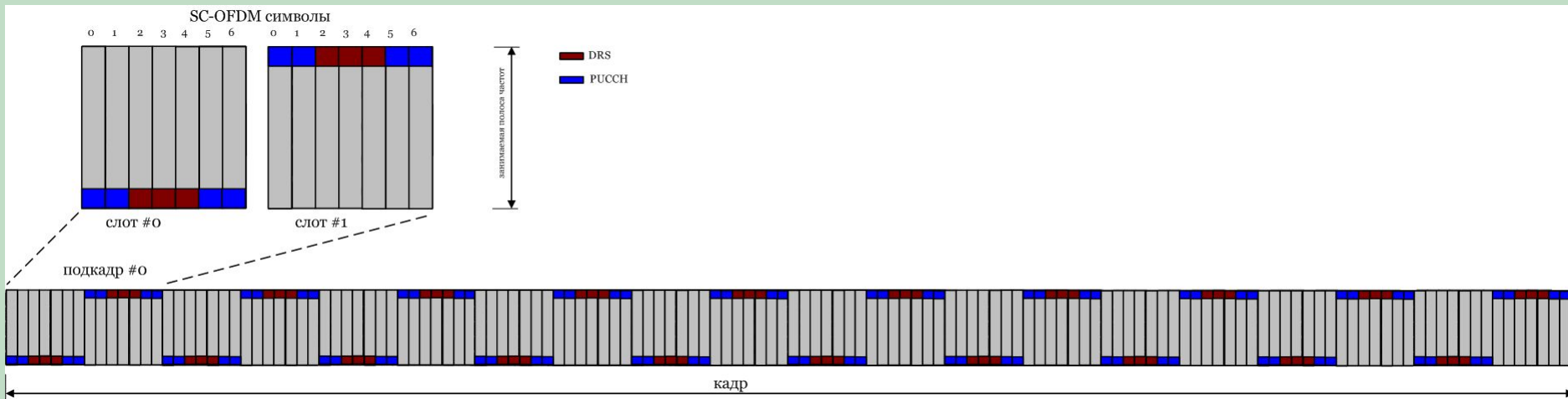
- Способ мультиплексирования опорных сигналов демодуляции зависит от режима MIMO
  - Разнесение с коммутацией антенн: частотное разделение
  - MU-MIMO: кодовое разделение сигналов от каждого абонента
- Способ мультиплексирования опорных сигналов зондирования зависит от заданной полосы частот
  - Одинаковая 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. – 2<sup>nd</sup> ed. Wiley. 2011.