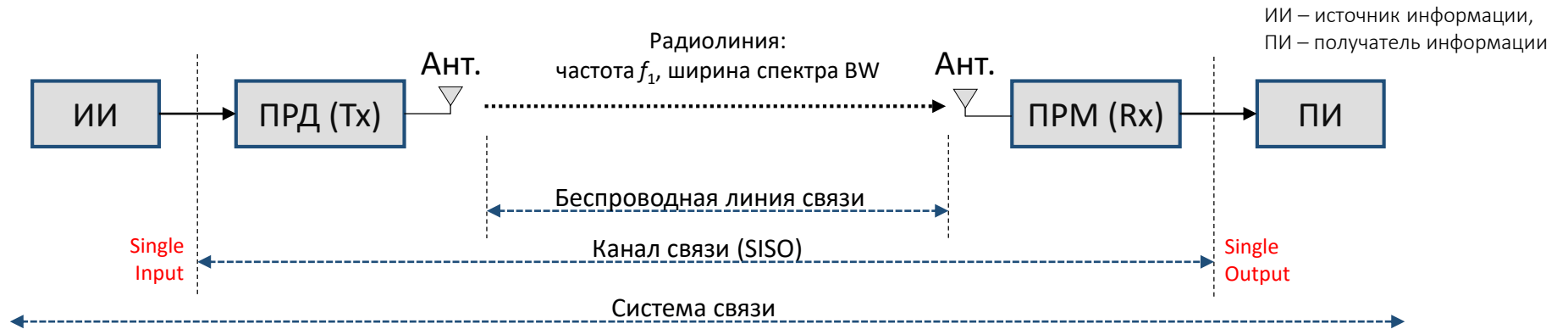


- 1. Линия связи с множественными входами и выходами (MIMO)**
  - виды систем и основные понятия (MIMO, MISO, SIMO, MU-MIMO)
  - алгоритмы работы (TxD, RxD, SM)
  - матрицы преобразования в цифровом тракте NR
  - цифровой тракт обработки сигналов
  - 3D управление диаграммой направленности излучения антенной системы (FD-MIMO)
- 2. Агрегация частот (CA)**
  - принцип агрегации частот, типы сот
  - режимы CA
- 3. Подключение абонентского терминала к двум базовым станциям DC**
  - принцип двойного подключения DC
  - виды двойного подключения (DC, MR-DC)
- 4. Компенсация дисбаланса линий UL/DL (Decoupling)**
  - дополнительные частотные диапазоны NR SUL
  - двойное подключение DC, MR-DC
- 5. Оценка пиковых скоростей радиointерфейса NR**

# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

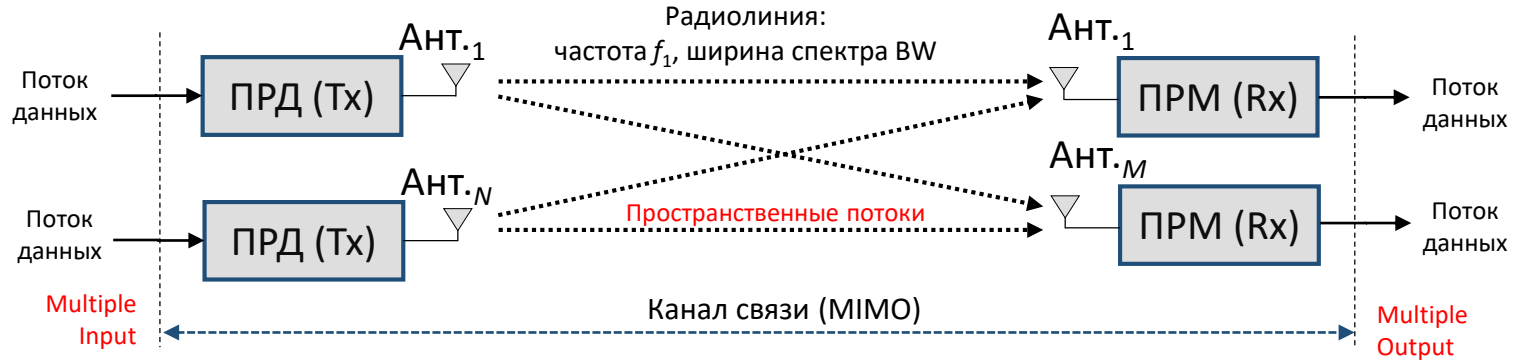
## Виды и основные понятия: SISO, MIMO

Классический канал связи – канал связи с одним входом и одним выходом (SISO)



Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO)

$$k \leq \min\{N, M\}$$



Примеры конфигураций MIMO:  
2T2R, 4T4R, 4T2R,  
8T8R и др.

Пиковая скорость передачи данных (предел Шеннона)

$$C_{\text{SISO}} = BW \cdot \log_2(1 + S/\text{Noise})$$

$$C_{\text{MIMO}} = k \cdot BW \cdot \log_2(1 + S/\text{Noise})$$

Коэффициент увеличения скорости передачи, равный количеству потоков данных в канале связи

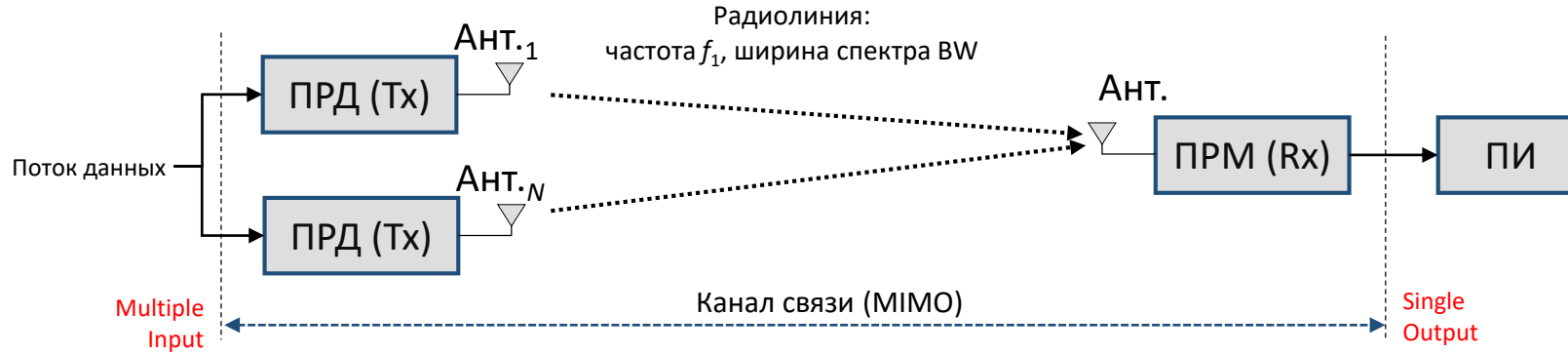
$M \cdot N$  – количество пространственных потоков в линии связи (Spatial Streams)  
 $k \leq \min\{N, M\}$  – количество потоков данных в канале связи (Data Streams)  
 $N$  – количество передающих антенн  
 $M$  – количество приемных антенн

# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

## Виды и основные понятия: MISO, SIMO.

Канал связи с множественными входами и одним выходом (MISO)

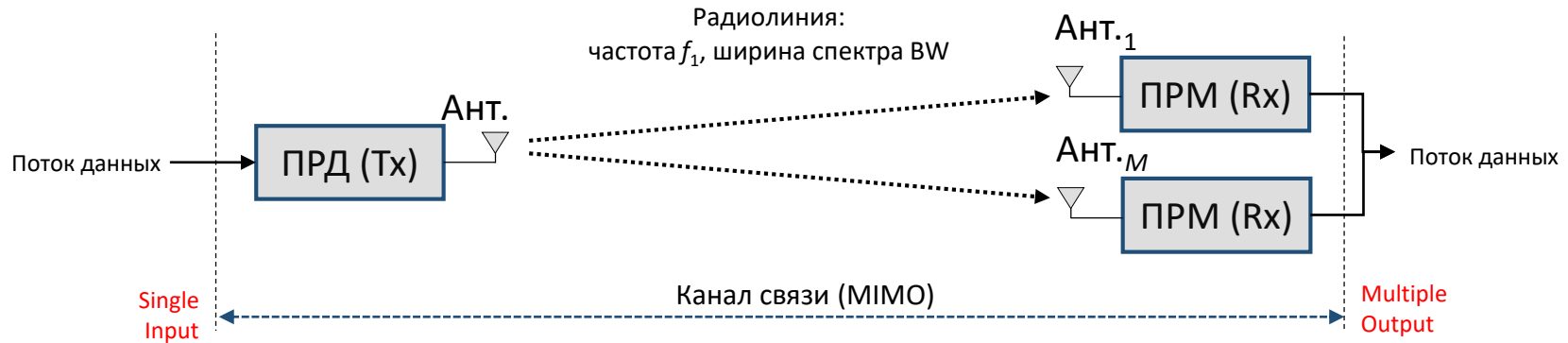
$$k = \min\{N, 1\} = 1$$



Примеры конфигураций MISO:  
2T1R, 4T1R.

Канал связи с одним входом и множественными выходами (SIMO)

$$k = \min\{1, M\} = 1$$



Примеры конфигураций SIMO:  
1T2R, 1T4R, 1T8R,  
1T32R и др.

**MISO** – пространственно разнесенная передача TxD (Transmit diversity), количество потоков данных  $k=1$

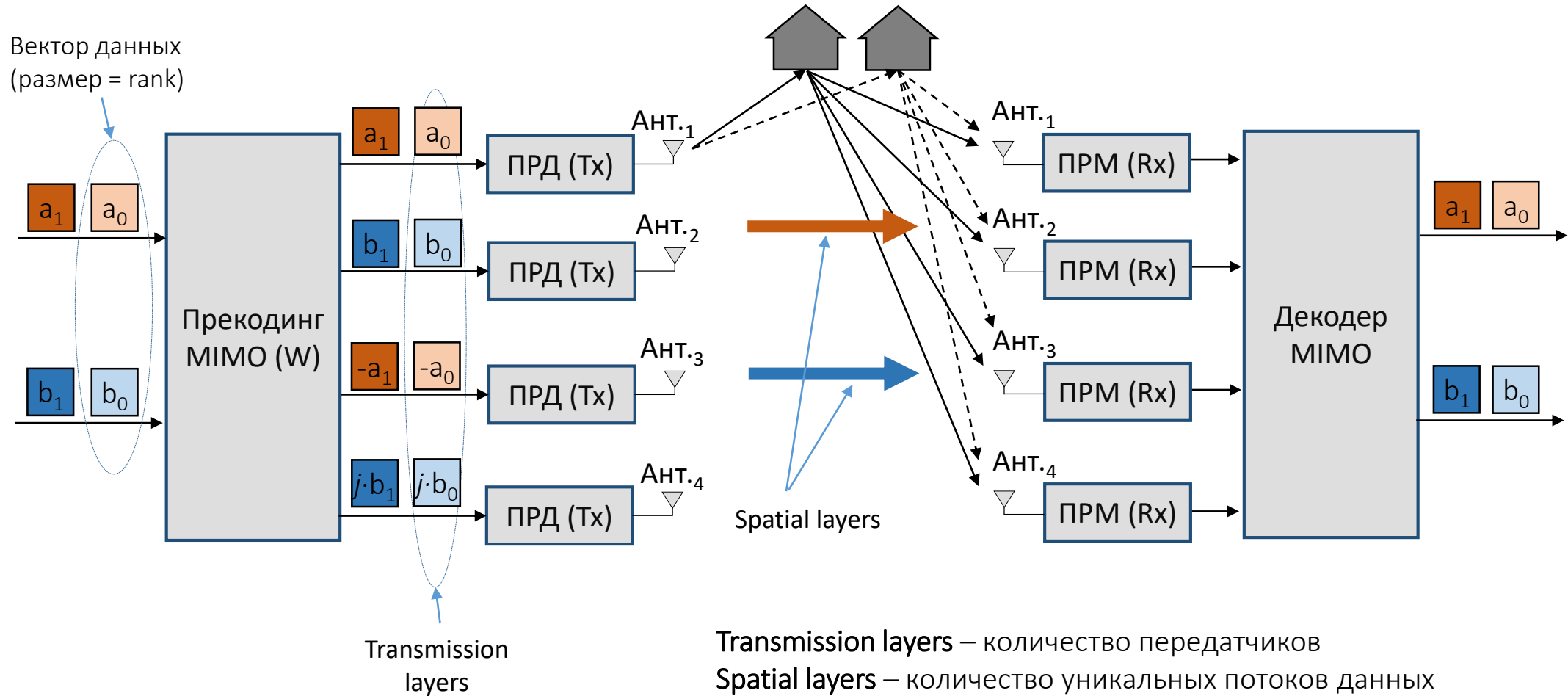
**SIMO** – пространственно разнесенный прием RxD (Receive diversity), количество потоков данных  $k=1$ .

Цель использования MISO, SIMO – повышение отношения сигнал/шум

$$C_{SIMO} = BW \cdot \log_2(1 + M \cdot (S/Noise)) \quad C_{MISO} = BW \cdot \log_2(1 + N \cdot (S/Noise))$$

# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

Терминология MIMO: Transmission layers, Spatial layers, Rank



Transmission layers – количество передатчиков

Spatial layers – количество уникальных потоков данных

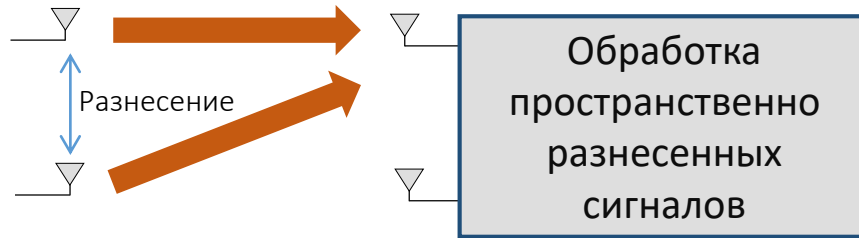
Rank = Spatial layers

# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

Виды и основные понятия: TxD, RxD, SM.

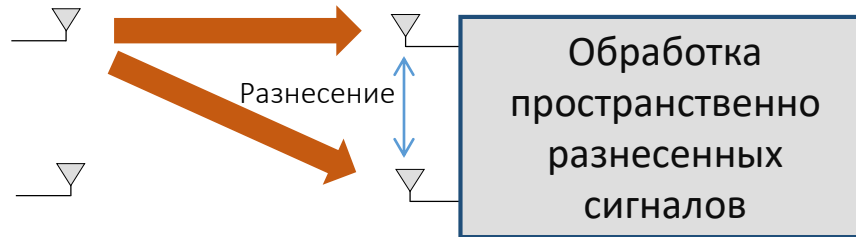
## Разнесённая передача – TxD (Tx Diversity)

По обоим пространственным потокам передается *одинаковая* информация



## Разнесённый прием – RxD (Rx Diversity)

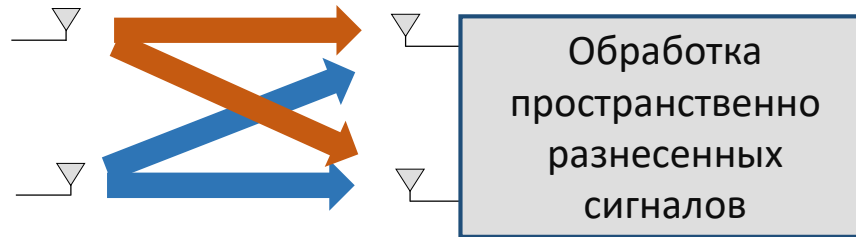
По обоим пространственным потокам передается *одинаковая* информация



Разнесение увеличивает надёжность приёма и площадь покрытия, работает при низком SNR

## Пространственное мультиплексирование (сложение) – SM (Spatial Multiplexing)

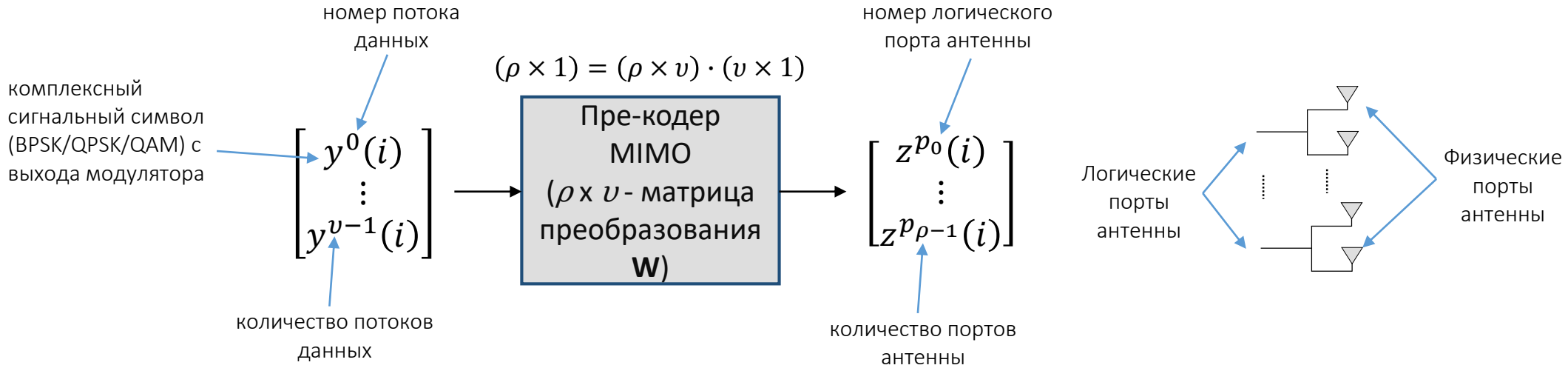
По пространственным потокам передается *разная* информация



Мультиплексирование увеличивает скорость передачи данных, работает при высоком SNR

# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

Пространственно разнесенная передача (TxD), пространственное мультиплексирование (SM) в NR.



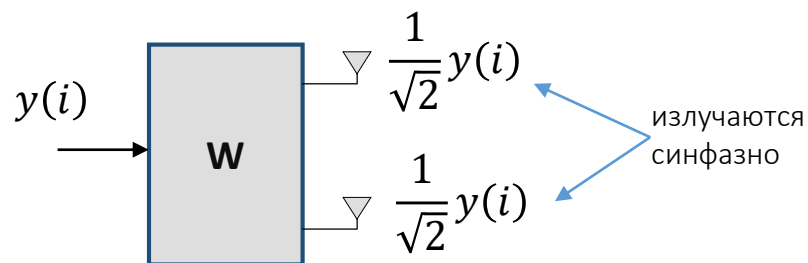
$$\begin{bmatrix} z^{p_0}(i) \\ \vdots \\ z^{p_{\rho-1}}(i) \end{bmatrix} = \mathbf{w} \cdot \begin{bmatrix} y^0(i) \\ \vdots \\ y^{v-1}(i) \end{bmatrix}$$

| Потоки/порты  | Режим передачи/линия  |    |  |    |
|---|---|----|--|----|
|   | Пространственно разнесенная передача TxD (Transmit Diversity) |    | Пространственное мультиплексирование SM (Spatial Multiplexing) |    |
|   | UL  | DL | UL   | DL |
| Максимальное количество потоков данных ( $v$ )                      | 1   | -  | 4  | 8  |
| Максимальное количество <b>ЛОГИЧЕСКИХ</b> портов антенны ( $\rho$ ) | 4   | -  | 4  | 8  |

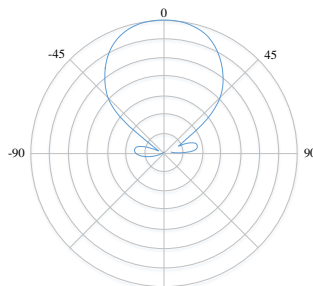
# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO). Пространственно разнесенная передача (TxD) в NR.

Выборочные примеры прекодинга MIMO NR при пространственно разнесенной передаче 2T1R

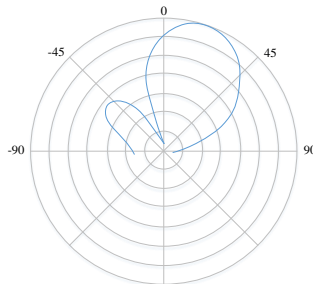
$$\mathbf{z} = \mathbf{W} \cdot y(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot y(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} y(i) \\ y(i) \end{bmatrix}$$



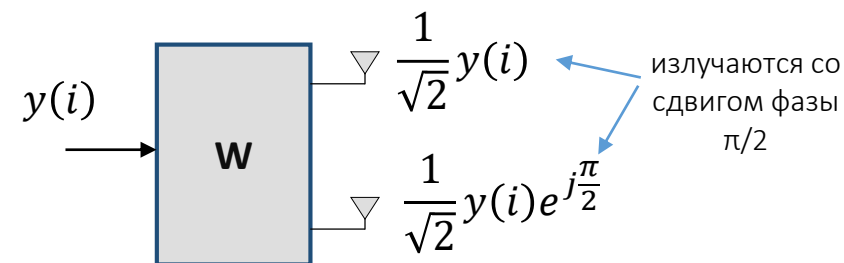
$$\mathbf{W} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$



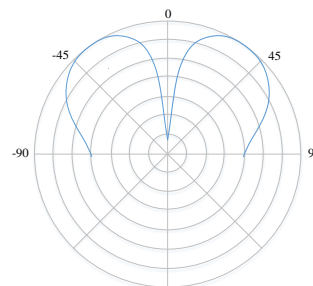
$$\mathbf{W} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$$



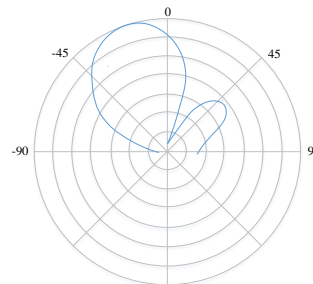
$$\mathbf{z} = \mathbf{W} \cdot y(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \cdot y(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} y(i) \\ y(i)e^{j\pi/2} \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{W} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{W} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$$

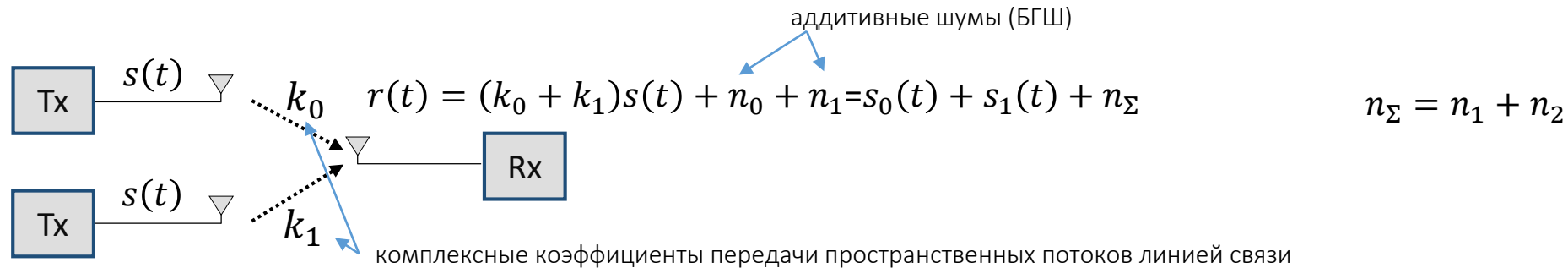


Справка: формула Эйлера  $e^{jx} = \cos x + j \sin x$

# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

## Пространственно разнесенная передача (TxD).

Пространственно разнесенная передача TxD: режим 2T1R **Gain, dB = 10log(Ntx)**



$$P_{c \text{ прм}} = \frac{1}{T} \int_0^T s_{\text{прм}}(t)^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T (s_0(t) + s_1(t))^2 dt = P_{s0} + P_{s1} + \frac{2}{T} \int_0^T s_0(t)s_1(t) dt$$

Примем  $k_0 = k_1$ ,  $P_{s0} = P_{s1} = P_{\text{с потока}}$

Когерентное сложение сигналов  $s_0(t)$  и  $s_1(t)$ :  $P_{c \text{ прм}} = 4P_{\text{с потока}}$

Сложение сигналов в противофазе  $s_0(t)$  и  $s_1(t)$ :  $P_{c \text{ прм}} = 0$

$$P_{\text{ш прм}} = \frac{1}{T} \int_0^T (n_0(t) + n_1(t))^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T n_0(t)^2 + 2n_0(t)n_1(t) + n_1(t)^2 dt =$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T n_0(t)^2 dt + \frac{2}{T} \int_0^T n_0(t)n_1(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T n_1(t)^2 dt = 2 \frac{1}{T} \frac{N_0}{2} = 2\Delta f \frac{N_0}{2} = 2 \cdot P_{\text{ш потока}}$$

слагаемое равно нулю, так как БГШ - не коррелируемый случайный процесс

спектральная плотность БГШ

корреляционная функция сигналов

Потенциальное увеличение отношения с/ш при пространственной разнесенной передаче 2T1R в 2 раза:

$$4 \cdot P_{\text{с потока}} / 2 \cdot P_{\text{ш потока}} = 2P_{\text{с потока}} / P_{\text{ш потока}} \text{ или } 10\lg 2 = 3 \text{ дБ}$$

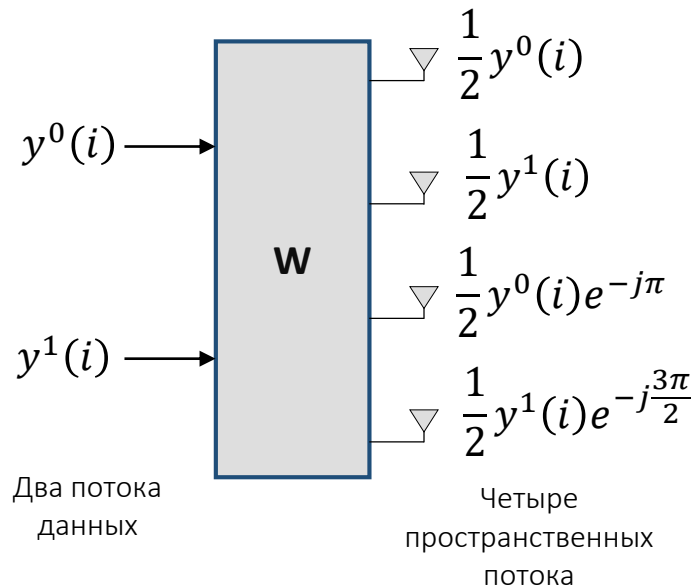


# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

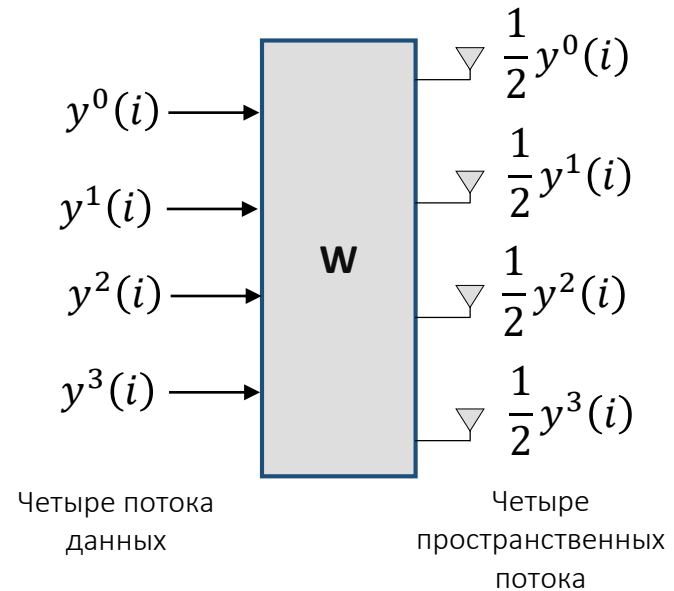
## Пространственное мультиплексирование (SM) в NR.

Выборочные примеры прекодинга MIMO в NR при пространственном мультиплексировании 4T2R, 4T4R

$$\mathbf{Z} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{Y} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ 0 & -j \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y^0(i) \\ y^1(i) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} y^0(i) \\ y^1(i) \\ y^0(i)e^{-j\pi} \\ y^1(i)e^{-j\frac{3\pi}{2}} \end{bmatrix}$$

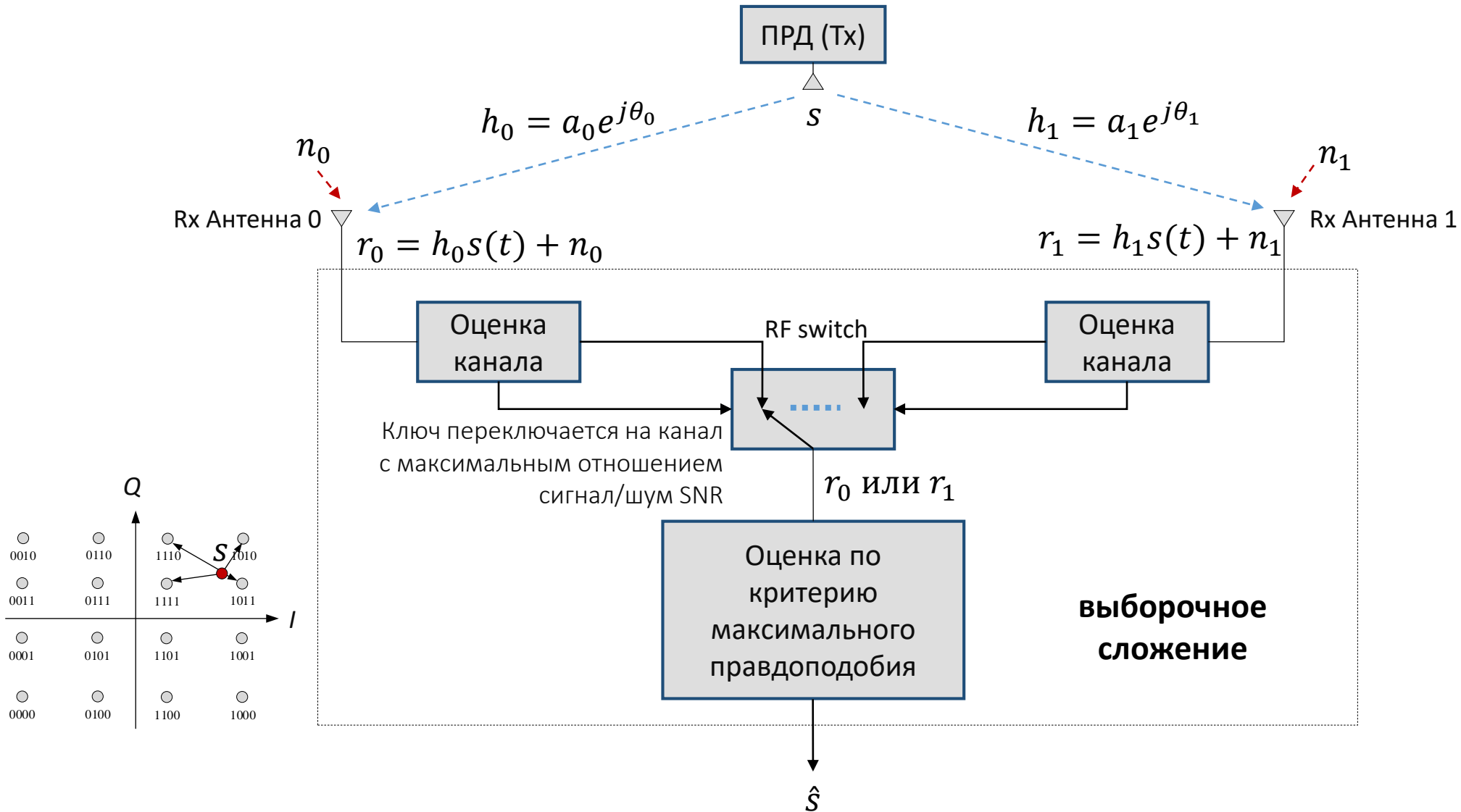


$$\mathbf{Z} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{Y} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y^0(i) \\ y^1(i) \\ y^2(i) \\ y^3(i) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} y^0(i) \\ y^1(i) \\ y^2(i) \\ y^3(i) \end{bmatrix}$$



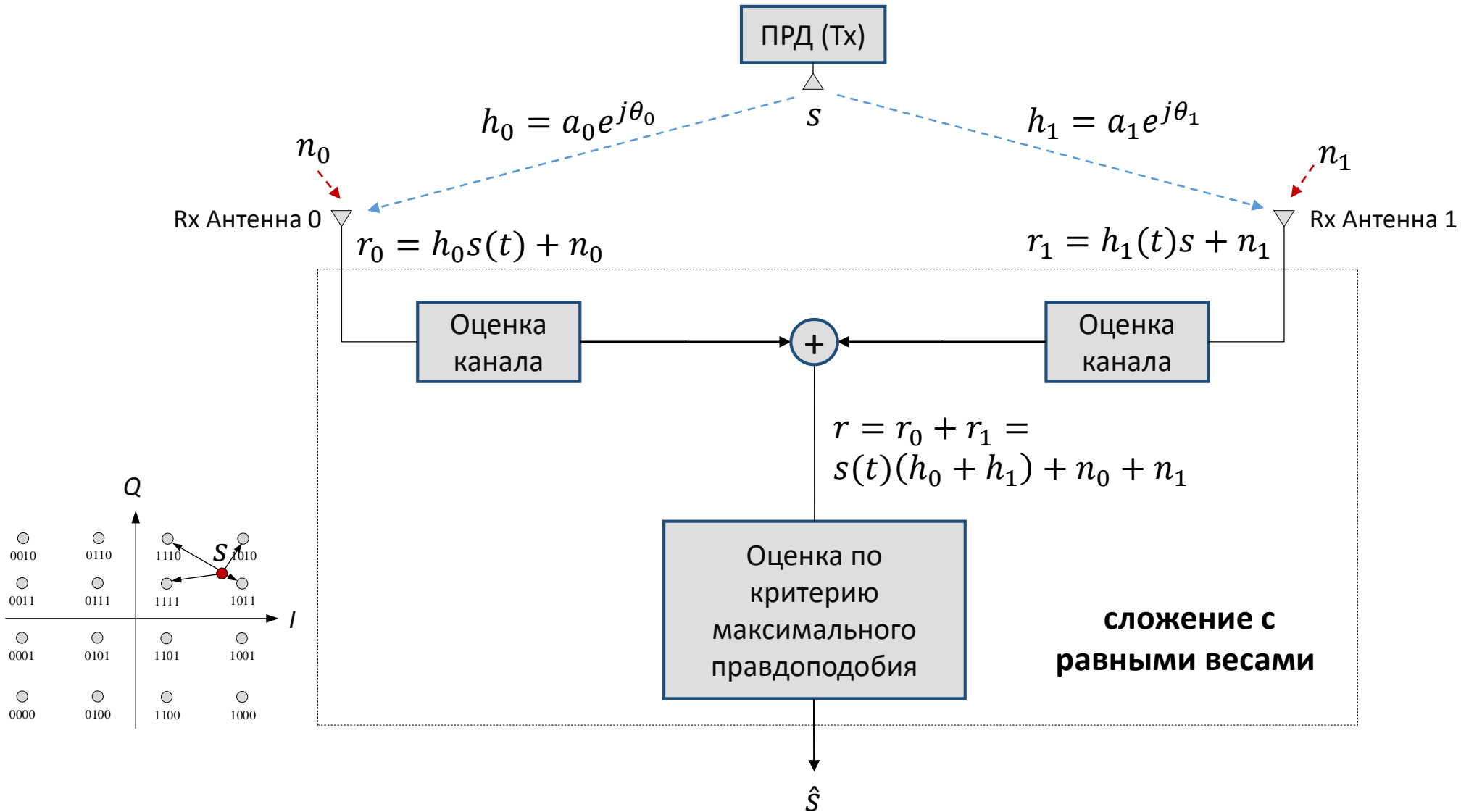
# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

Пространственно разнесенный прием – выборочное сложение SC (Selection Combining).



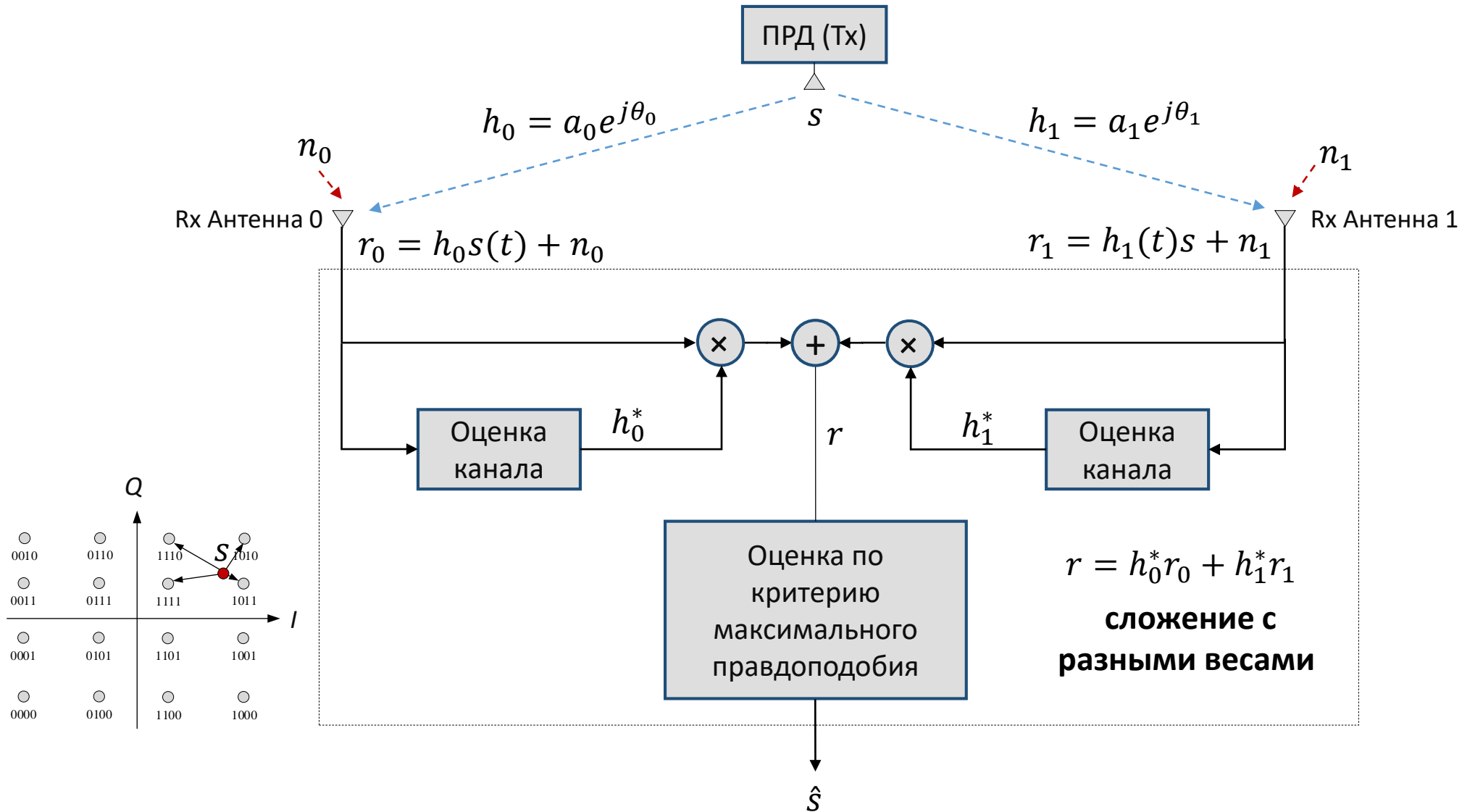
# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

Пространственно разнесенный прием – равновесное сложение EGC (Equal Gain Combining).



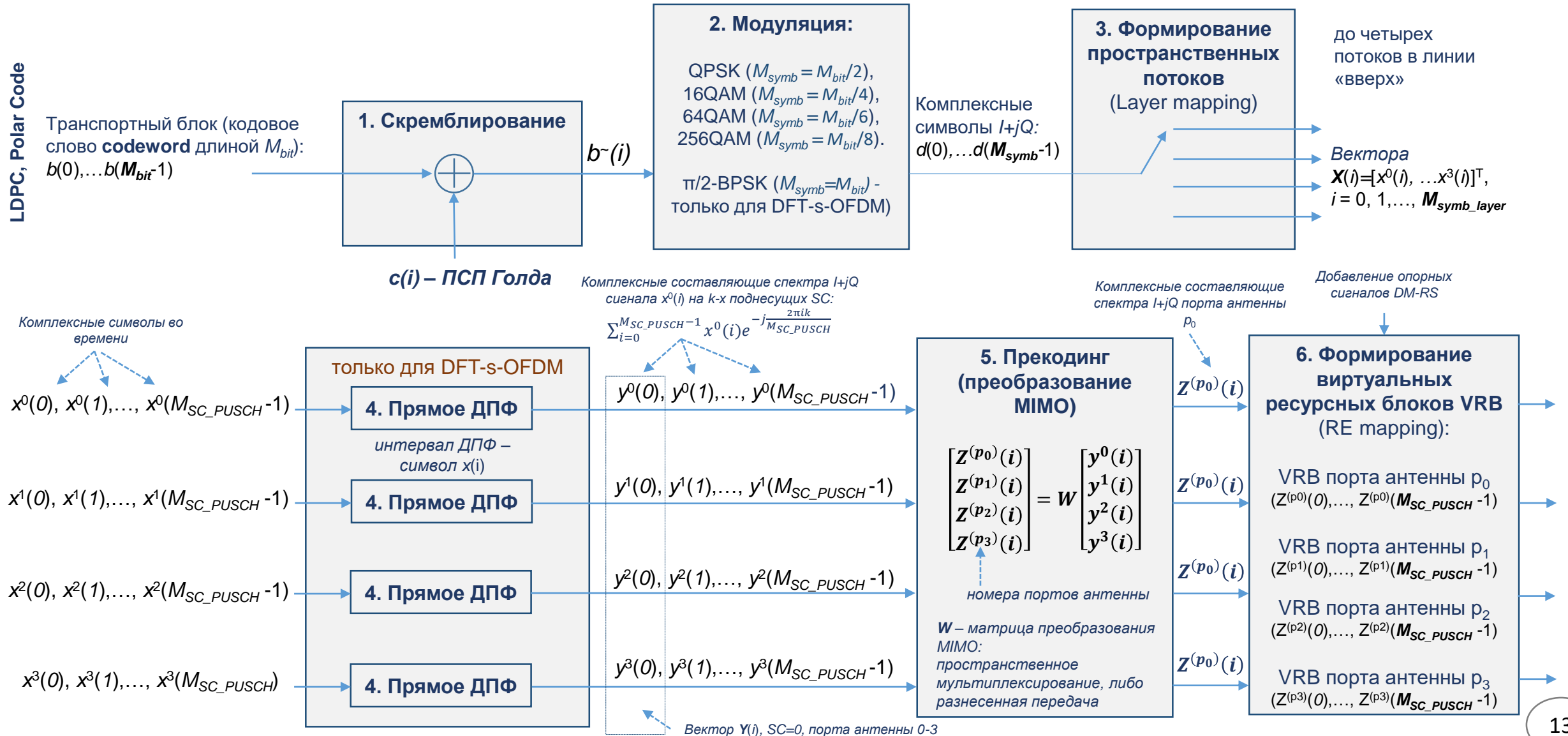
# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

Пространственно разнесенный прием – весовое сложение MRC (Maximal Ratio Combining).



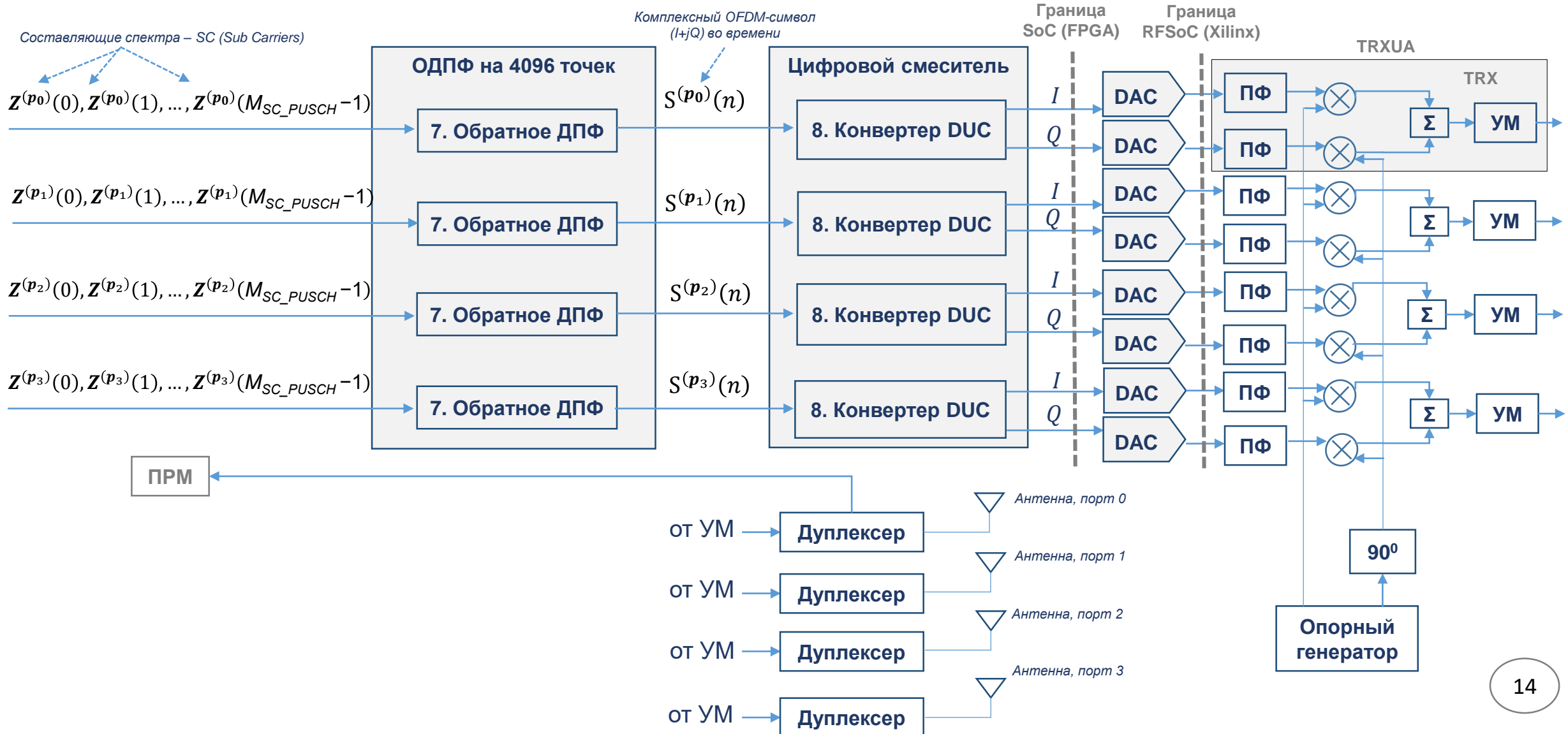
# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

## Цифровой тракт обработки сигналов передатчика AT 5G



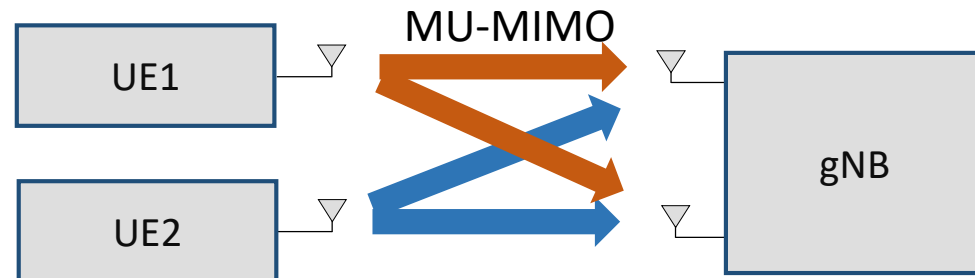
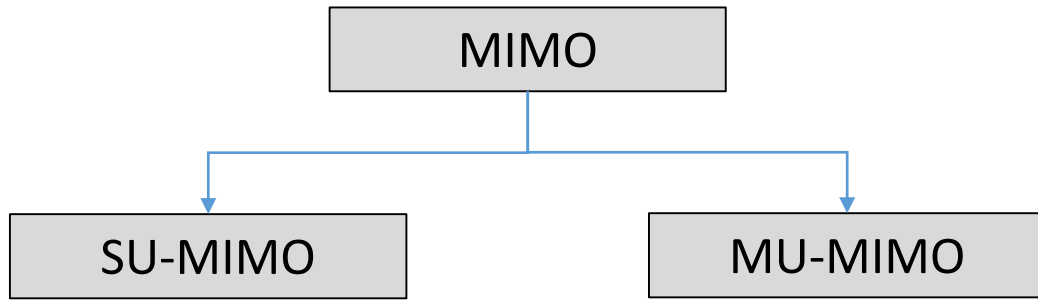
# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

## Цифровой тракт обработки сигналов передатчика AT 5G



# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

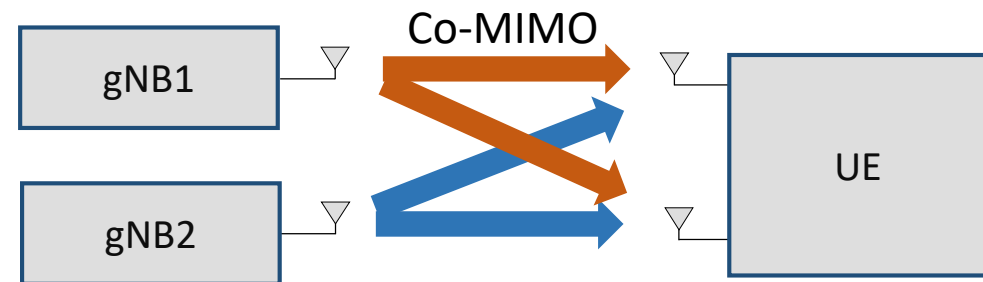
Виды и основные понятия: SU-MIMO, MU-MIMO.



MU-MIMO в линии UL

**Single User MIMO** - система связи обслуживает одного абонента в заданной полосе частот

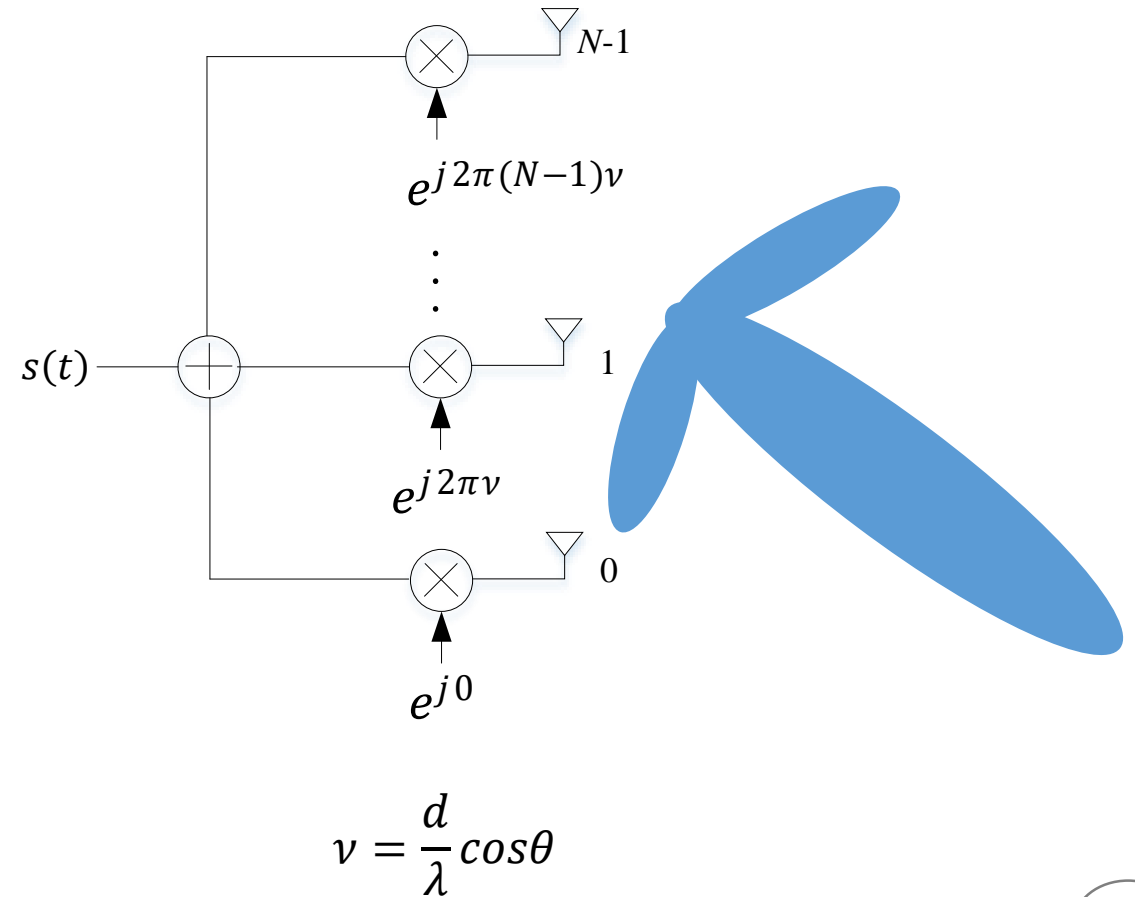
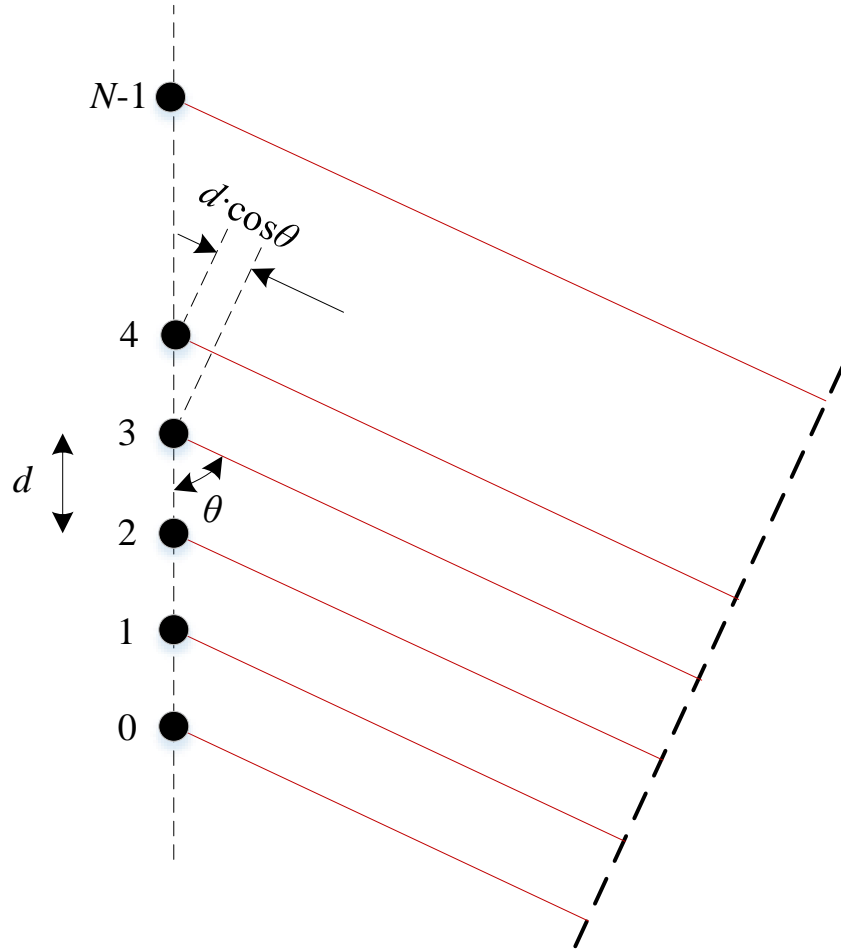
**Multi User MIMO** – система связи обслуживает одновременно нескольких абонентов в общей заданной полосе частот



MU-MIMO в линии DL на основе формирования узконаправленных излучений (Beamforming)

# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

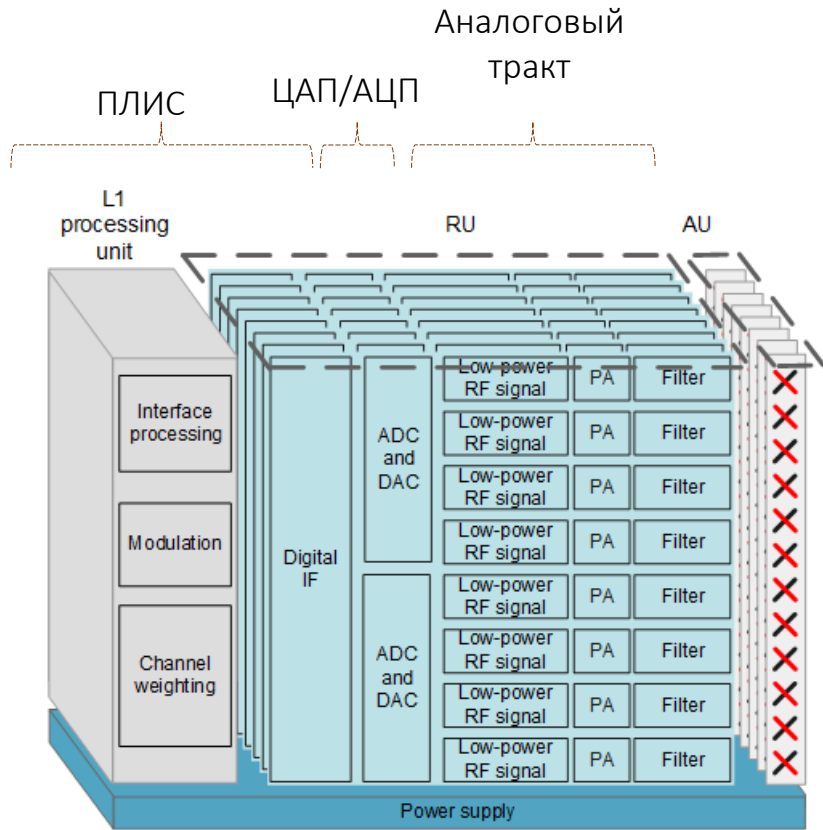
Виды и основные понятия Beamforming.





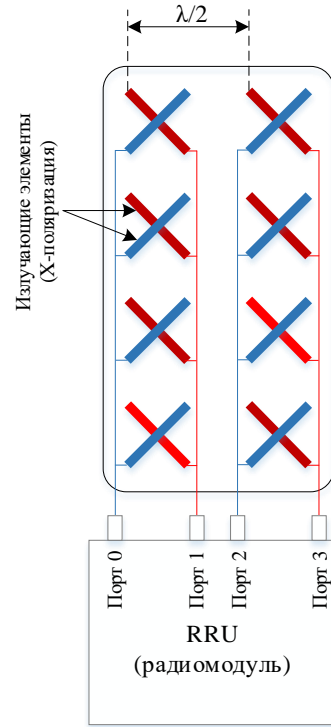
# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

## Активная антенная система базовой станции gNB



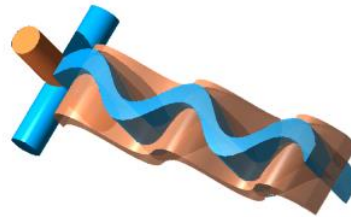
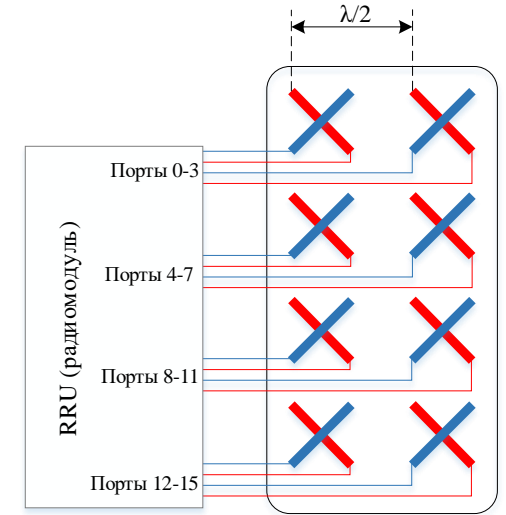
Digital IF – цифровой (смеситель) преобразователь частоты (DDC/DUC)

AU (Антенная система) – например, 192 антенных элемента (массив 8x12 с х-поляризацией)

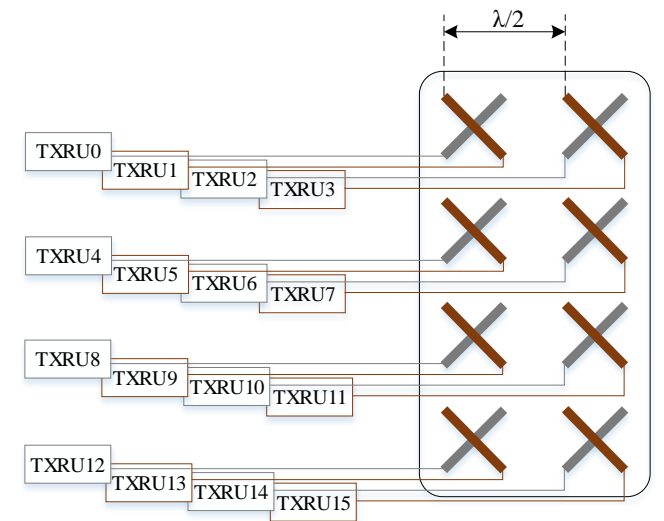


2D MIMO

3D MIMO или FD-MIMO (Full Dimension)

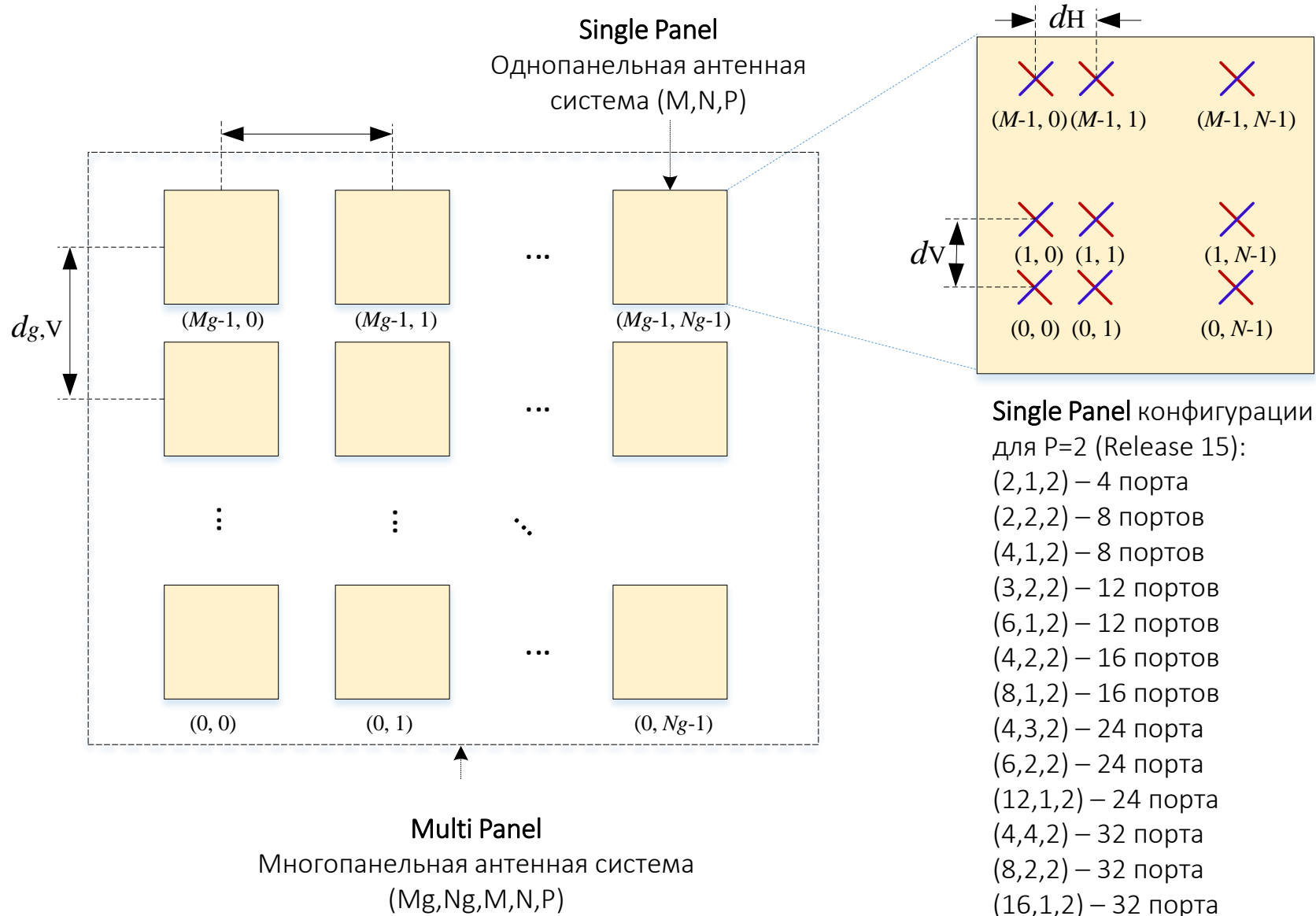


Электромагнитное излучение с кросс-поляризацией



# 1. Канал связи с множественными входами и выходами (MIMO).

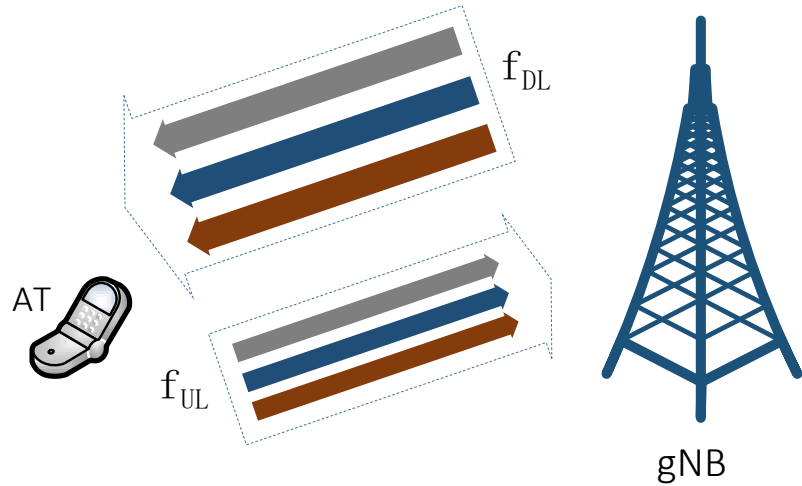
## Варианты антенных панелей в NR



## 2. Агрегация частот CA (Carrier Aggregation).

### Принцип агрегации частот.

Агрегация частот позволяет выделить АТ больший частотный спектр, и, как следствие, увеличить пиковую скорость передачи данных



Максимально 16 компонент частот, 1 ГГц агрегируемого спектра  
CC (Component Carrier)



CC BW: (до 100 МГц в FR1, до 400 МГц в FR2)



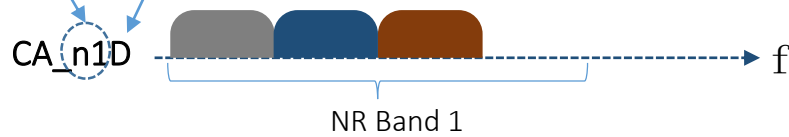
Симметричное распределение спектра для линий UL/DL



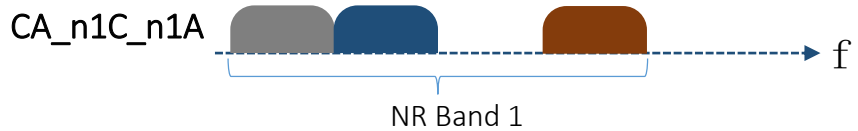
Асимметричное распределение спектра для линий UL/DL



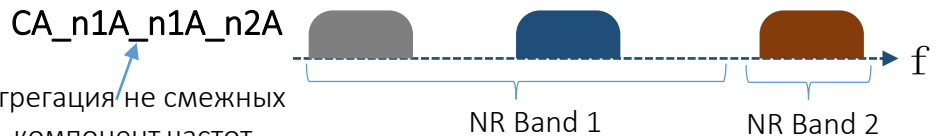
NR Band Класс агрегации



**Intra-band, contiguous** – агрегация смежных (примыкающих) компонент частот CC, расположенных в одном частотном диапазоне



**Intra-band, non-contiguous** – агрегация не смежных компонент частот CC, расположенных в одном частотном диапазоне

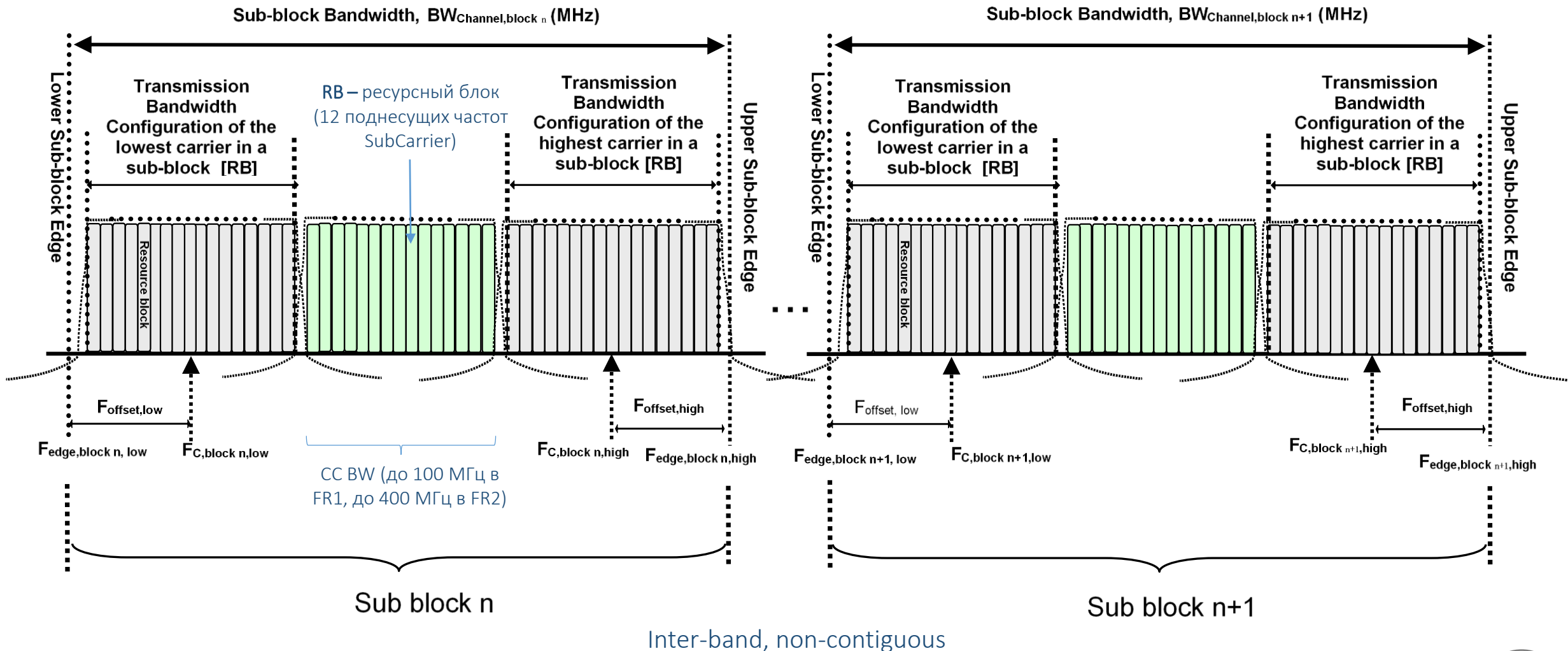


**Inter-band, non-contiguous** – агрегация не смежных компонент частот CC, расположенных в разных частотных диапазонах

Агрегация не смежных компонент частот

## 2. Агрегация частот CA (Carrier Aggregation).

### Принцип агрегации частот.



## 2. Агрегация частот CA (Carrier Aggregation).

### Принцип агрегации частот.

| Класс агрегации абонентского терминала | Агрегируемая полоса спектра   | Количество примыкающих компонент частот (CC) |
|--|---|--|
| A                                      | $BW_{\text{Channel\_CA}} \leq BW_{\text{Channel,max}}$                            | 1  |
| B                                      | $20 \text{ MHz} \leq BW_{\text{Channel\_CA}} \leq 50 \text{ MHz}$                 | 2  |
| C                                      | $100 \text{ MHz} < BW_{\text{Channel\_CA}} \leq 2 \times BW_{\text{Channel,max}}$ | 2  |
| D                                      | $200 \text{ MHz} < BW_{\text{Channel\_CA}} \leq 3 \times BW_{\text{Channel,max}}$ | 3  |
| E                                      | $300 \text{ MHz} < BW_{\text{Channel\_CA}} \leq 4 \times BW_{\text{Channel,max}}$ | 4  |
| F                                      | $50 \text{ MHz} < BW_{\text{Channel\_CA}} \leq 100 \text{ MHz}$                   | 2  |
| G                                      | $100 \text{ MHz} < BW_{\text{Channel\_CA}} \leq 150 \text{ MHz}$                  | 3  |
| H                                      | $150 \text{ MHz} < BW_{\text{Channel\_CA}} \leq 200 \text{ MHz}$                  | 4  |
| I                                      | $200 \text{ MHz} < BW_{\text{Channel\_CA}} \leq 250 \text{ MHz}$                  | 5  |
| J                                      | $250 \text{ MHz} < BW_{\text{Channel\_CA}} \leq 300 \text{ MHz}$                  | 6  |
| K                                      | $300 \text{ MHz} < BW_{\text{Channel\_CA}} \leq 350 \text{ MHz}$                  | 7  |
| L                                      | $350 \text{ MHz} < BW_{\text{Channel\_CA}} \leq 400 \text{ MHz}$                  | 8  |

$BW_{\text{Channel,max}}$  – максимальная ширина спектра одной компоненты частот CC (до 100 МГц в FR1, до 400 МГц в FR2)

Максимальная агрегируемая полоса примыкающих компонент:

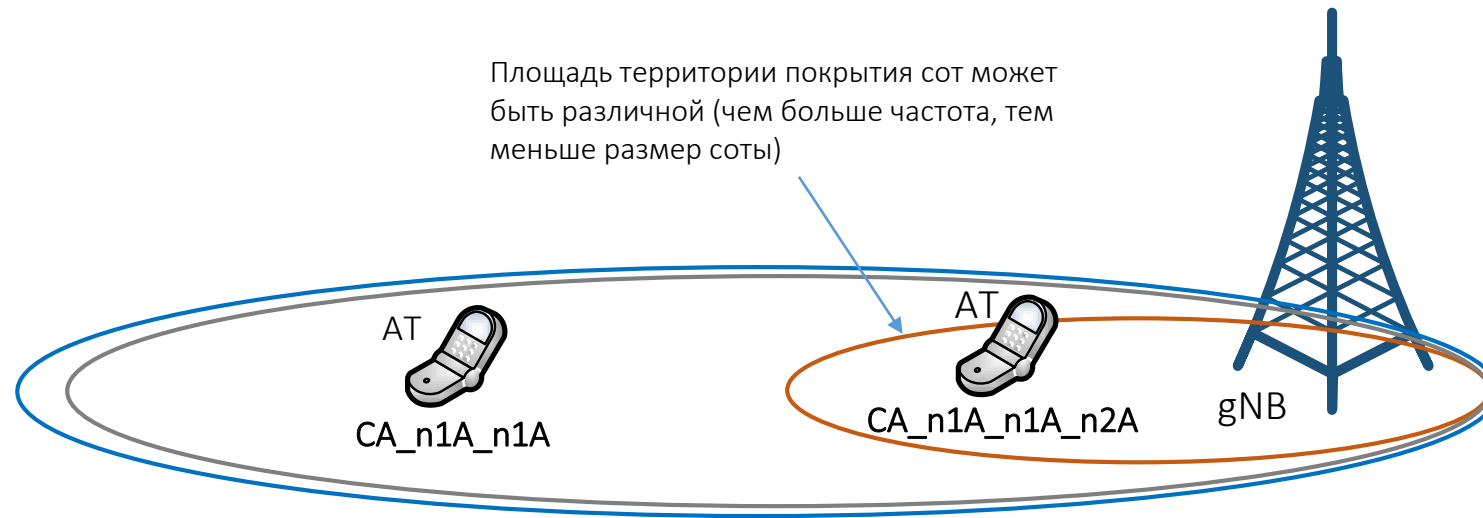
$4 \times 100 = \mathbf{400 \text{ МГц в FR1}}$

$2 \times 400 + 200 = \mathbf{1000 \text{ МГц в FR2}}$

Максимальное количество агрегируемых примыкающих компонент частот – 8 (класс L)

## 2. Агрегация частот CA (Carrier Aggregation).

### Типы сот.



**PCell** – первичная (Primary) сота,  
**PCC** – первичная компонента частот

**Управление** и передача  
данных пользователей

Хендовер

**SCell** – вторичная (Secondary) сота,  
**SCC** – вторичная компонента частот

Передача данных  
пользователей

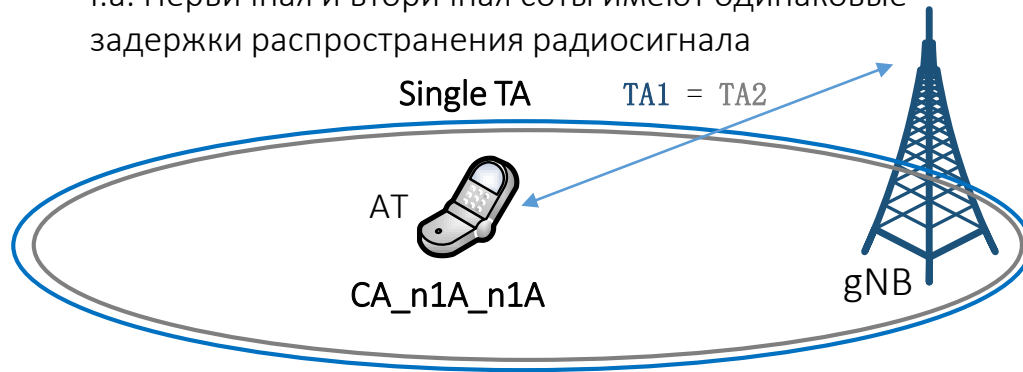
**SCell** – вторичная (Secondary) сота,  
**SCC** – вторичная компонента частот

Передача данных  
пользователей

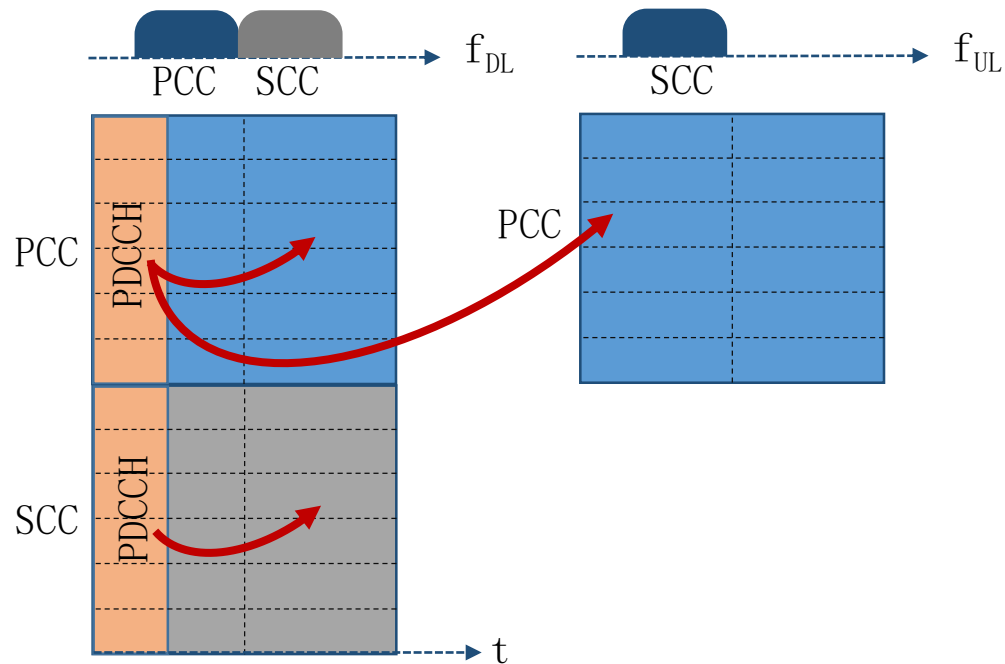
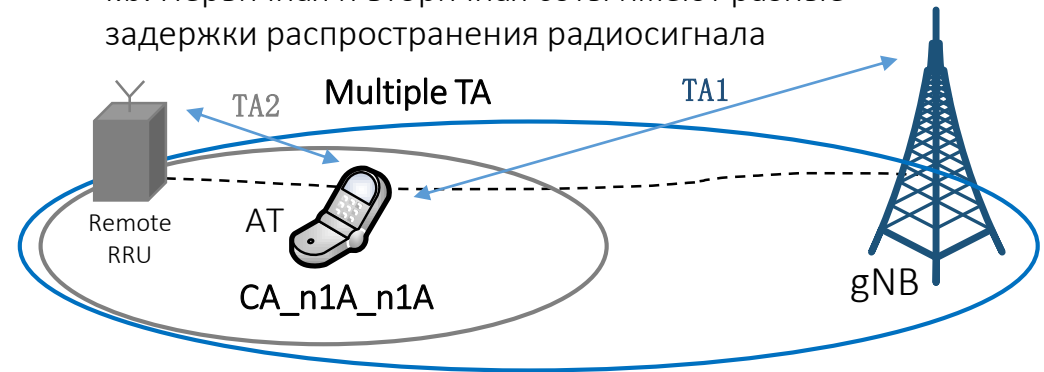
## 2. Агрегация частот CA (Carrier Aggregation).

### Типы сот.

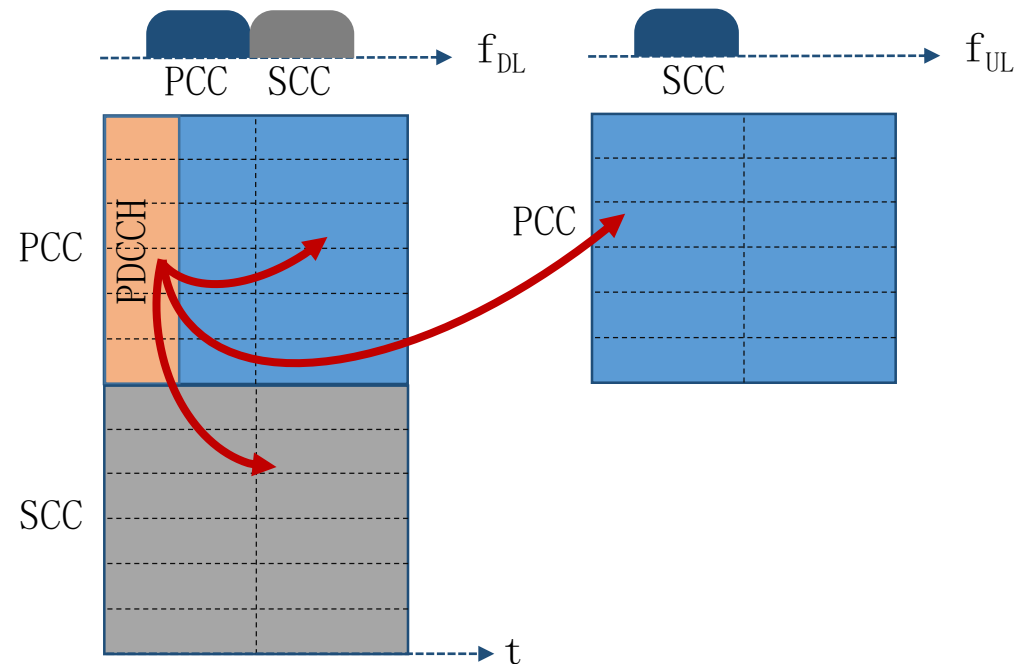
I.a. Первичная и вторичная соты имеют одинаковые задержки распространения радиосигнала



I.b. Первичная и вторичная соты имеют разные задержки распространения радиосигнала



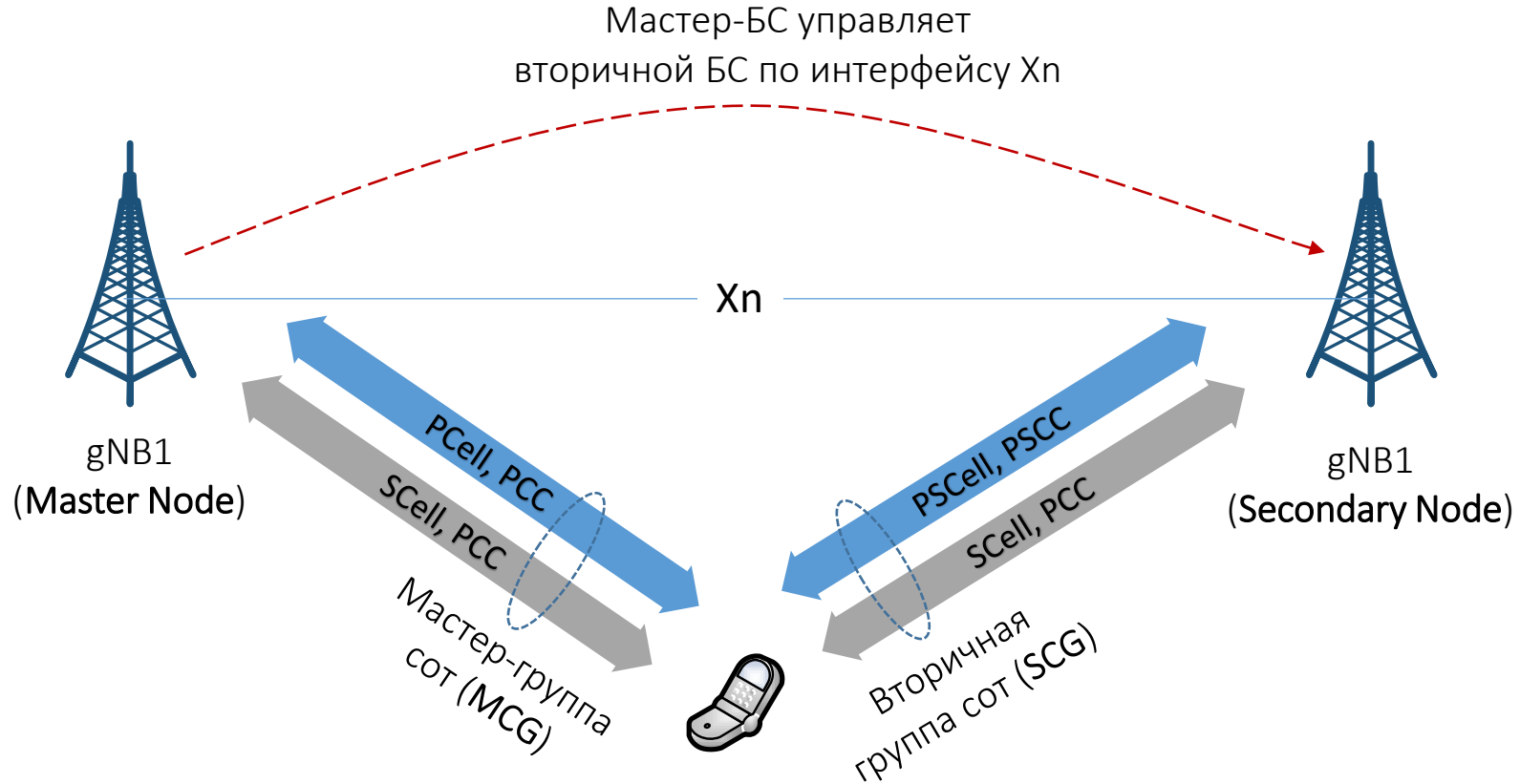
II.a. Управление ресурсом вторичной компоненты SCC осуществляется на той же частоте



II.b. Управление ресурсом вторичной компоненты SCC осуществляется на частоте первичной компоненты PCC

### 3. Подключение абонентского терминала к двум базовым станциям DC.

Принцип двойного подключения.



#### MCG (первичная группа сот)

PCell – первичная сота: SpCell (Special Cell) of MCG,  
PCC – первичная компонента частот

SCell – вторичная сота,  
SCC – вторичная компонента частот

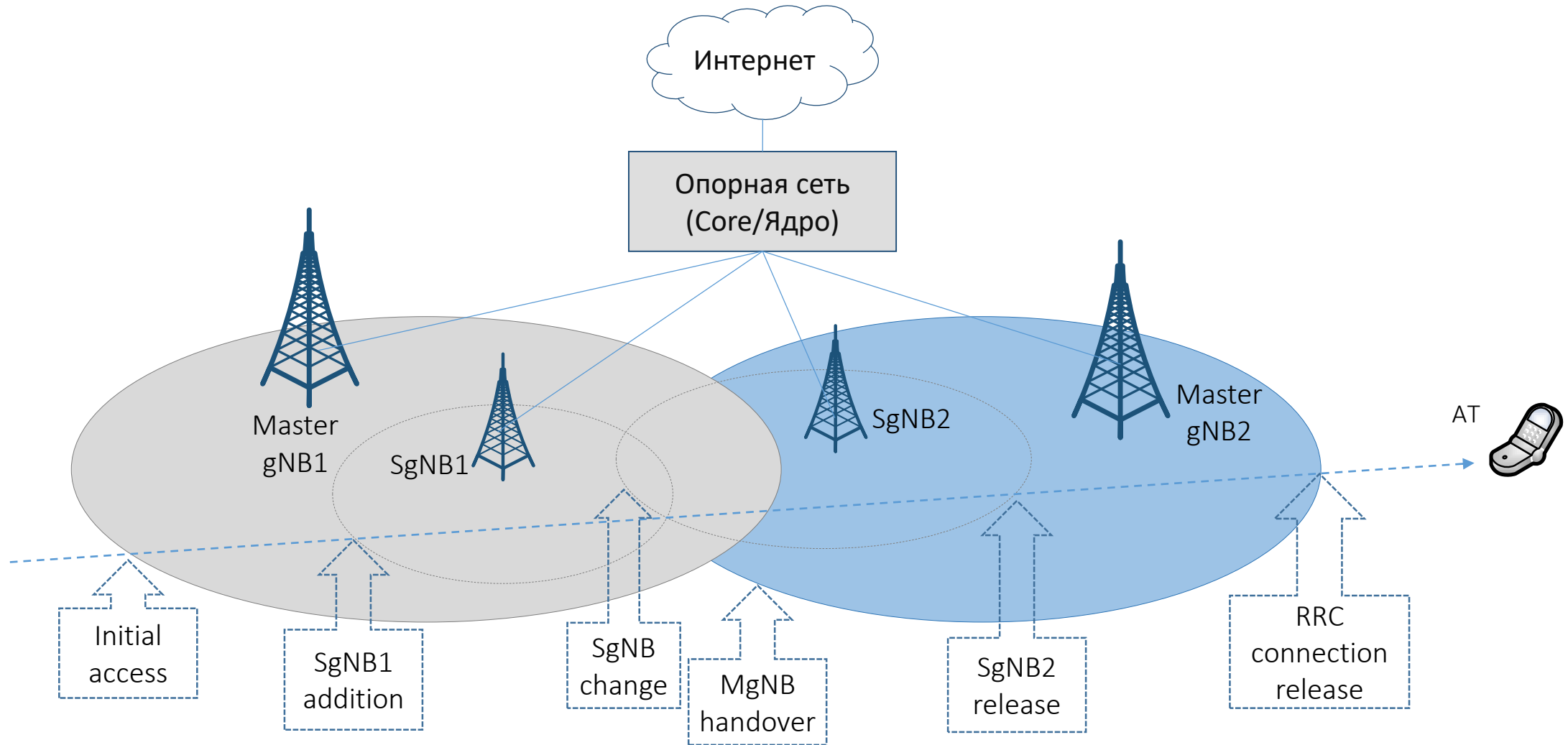
#### Вторичная группа сот (SCG)

PSCell – первичная сота: SpCell of SCG,  
PSCC – первичная компонента частот

SCell – вторичная сота,  
SCC – вторичная компонента частот

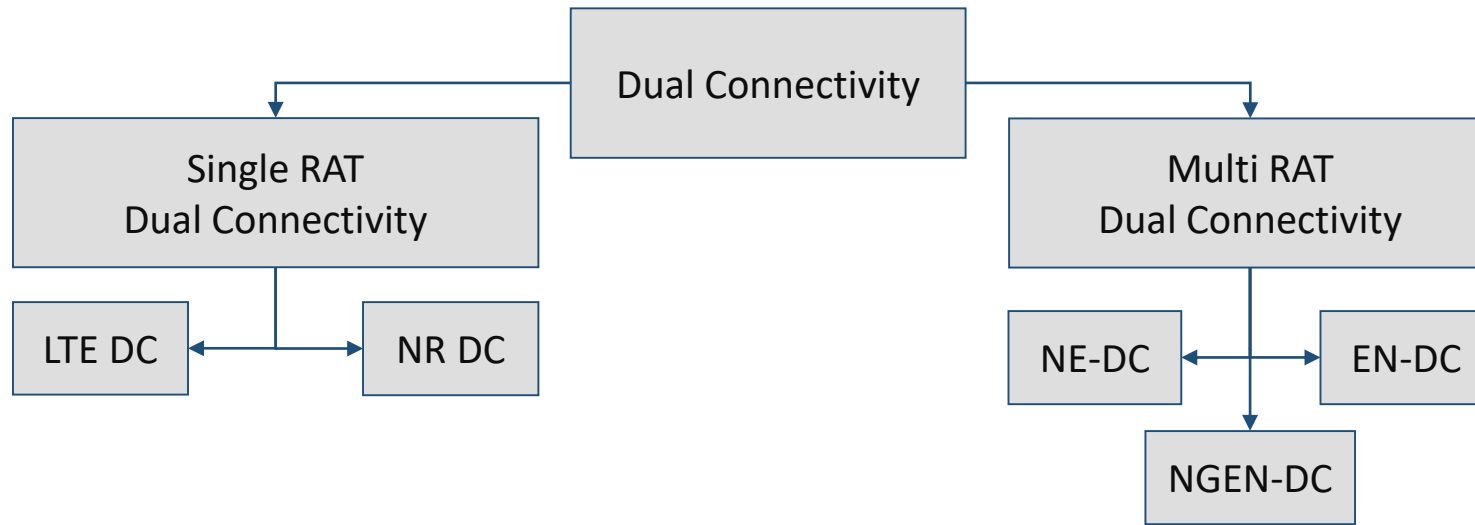


### 3. Подключение абонентского терминала к двум базовым станциям DC. Принцип двойного подключения, пример сетевых процедур при перемещении АТ.



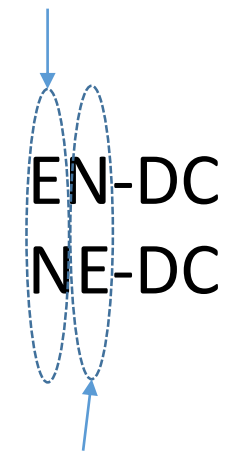
### 3. Подключение абонентского терминала к двум базовым станциям DC.

Виды двойного подключения: DC, MR-DC.



Первая буква - технология мастер-БС:  
 E = E-UTRAN (4G)  
 N = NR (5G)

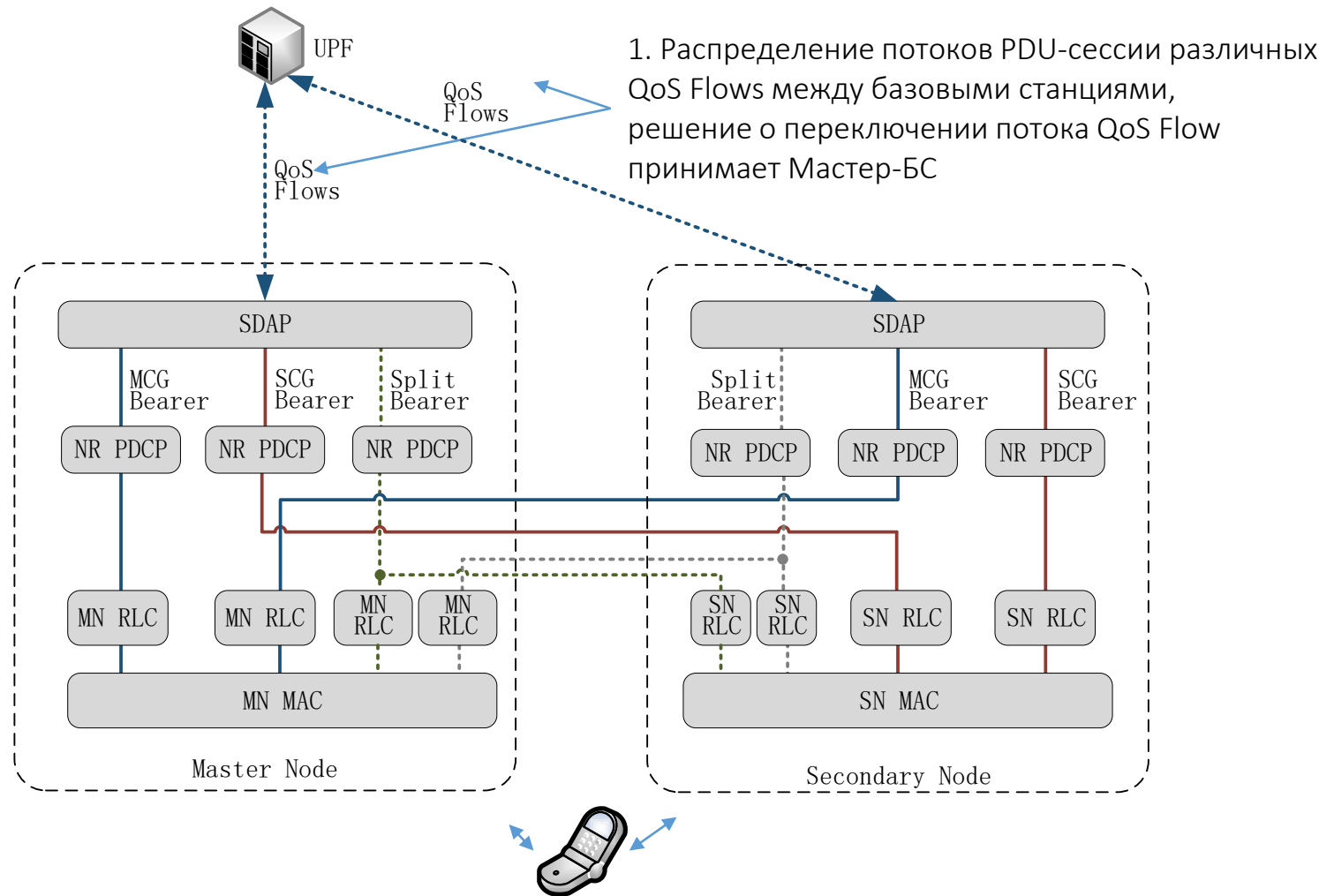
| Вид двойного подключения | Мастер-БС               | Вторичная БС            | Опорная сеть (ядро)  |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| NR DC                    | gNB (5G)                | gNB (5G)                | 5GC (5G)             |
| LTE DC                   | eNB (4G)<br>ng-eNB (4G) | eNB (4G)<br>ng-eNB (4G) | EPC (4G)<br>5GC (5G) |
| EN-DC                    | eNB (4G)                | en-gNB (5G)             | EPC (4G)             |
| NGEN-DC                  | ng-eNB (4G)             | gNB (5G)                | 5GC (5G)             |
| NE-DC                    | gNB (5G)                | ng-eNB (4G)             | <b>5GC (5G)</b>      |



вторая буква - технология вторичной БС: E или N

### 3. Подключение абонентского терминала к двум базовым станциям DC.

Виды двойного подключения: DC, MR-DC.



2. SDAP протокол базовой станции маппирует поток QoS Flow в DRB (Data Radio Bearer).

3. Мастер-БС управляет радиоресурсами, используемыми для передачи Data Radio Bearer: ресурсы мастер-группы сот MCG, ресурсы вторичной группы сот.

**DRB** – виртуальный канал радиоинтерфейса передачи данных пользователей с заданным качеством QoS

**MCG Bearer** – виртуальный канал DRB, использующий ресурсы сот мастер-группы

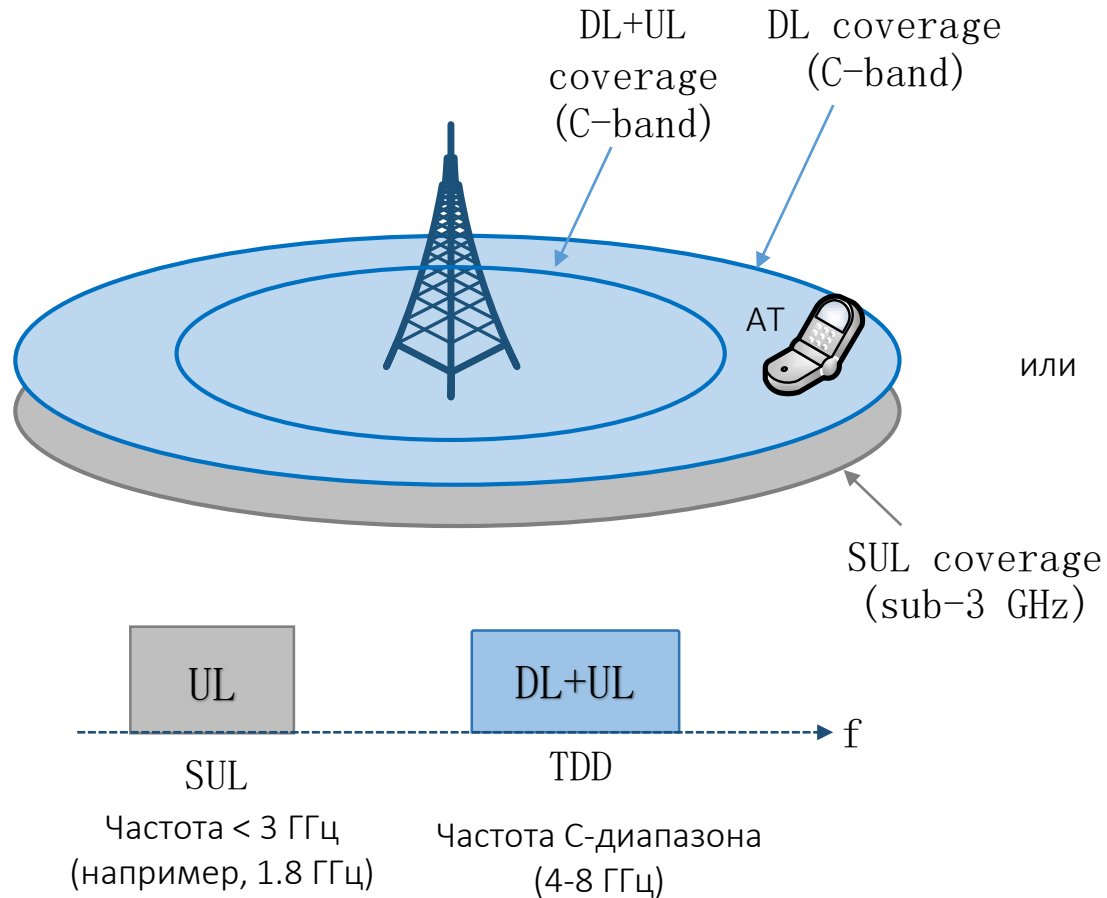
**SCG Bearer** – виртуальный канал DRB, использующий ресурсы сот вторичной группы

**Split Bearer** – разделяемый виртуальный канал DRB, использующий ресурсы сот мастер-группы и вторичной группы

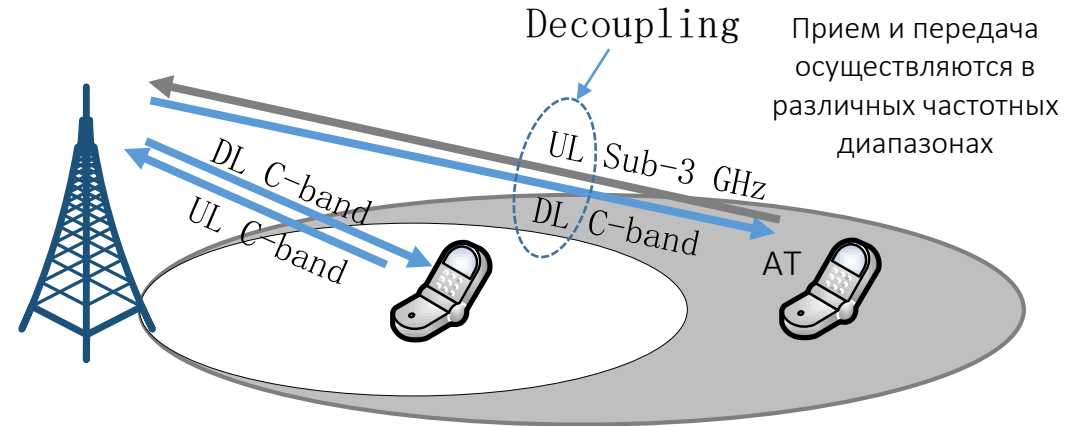
Разделяемые виртуальные каналы **Split Bearer** позволяют динамически использовать ресурсы сот групп MCG и SCG в зависимости от степени их загрузки, условий радиоприема

## 4. Компенсация дисбаланса линий UL/DL (Decoupling).

Дополнительные частотные диапазоны NR SUL.



или



Для радиointерфейса NR определены частотные диапазоны SUL (Supplementary UL), которые используются только для линии «вверх».

Цель использования SUL – устранение дисбаланса радиопокрытия линий DL/UL

Основная причина дисбаланса радиопокрытия линий DL/UL:

$P_{\text{изл\_БС}} \gg P_{\text{изл\_АТ}}$  (200 Вт БС против 200/400 мВт АТ)

## 5. Оценка пиковых скоростей радиointерфейса NR.

$$C \left( \frac{\text{Мбит}}{\text{с}} \right) = 10^{-6} \sum_{j=1}^J \left( v_{Layers}^j \cdot Q_m^j \cdot R_{max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW(j),\mu} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot (1 - OH^j) \right)$$

$J$  – количество агрегированных компонент частот (CC)

$v_{Layers}^j$  – количество потоков MIMO  $j$ -той компоненты частот (CC <sub>$j$</sub> )

$Q_m^j$  – порядок модуляции (количество бит в одном сигнальном символе)

$R_{max} = 948/1024$  – максимальная скорость кодирования

$\mu$  – нумерология

$T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^\mu}$  – средняя длительность OFDM-символа для нумерологии  $\mu$  и  $j$ -той компоненты частот CC <sub>$j$</sub>

$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$  – количество физических ресурсных блоков RB в полосе BW( $j$ ) с нумерологией  $\mu$

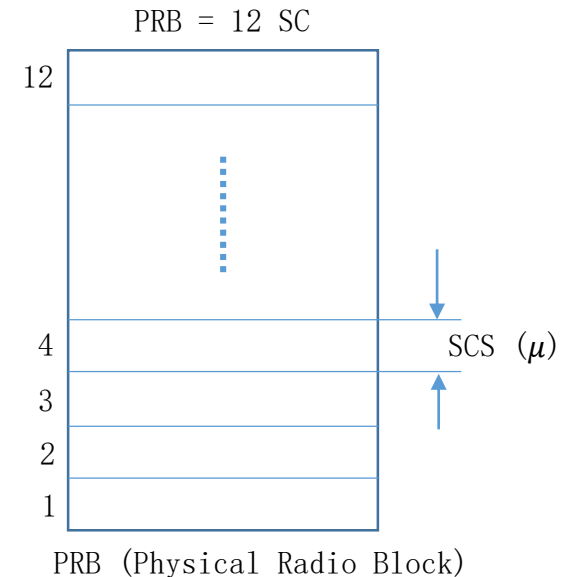
$OH^j$  – коэффициент, отражающий долю служебно-адресной части и принимающий значения:

0.14 – для линии DL поддиапазона FR1

0.18 – для линии DL поддиапазона FR2

0.08 – для линии UL поддиапазона FR1

0.10 – для линии UL поддиапазона FR2



## 5. Оценка пиковых скоростей радиointерфейса NR.

Таблица. Пиковая скорость передачи данных в линии DL

| Разнос<br>несущих<br>частот SCS, кГц | Полоса канала<br>/ пиковая скорость передачи данных (Гбит/с) при условии:  |         |         |         |
|--------------------------------------|--|---------|---------|---------|
|                                      | - количество агрегируемых компонент частот = 1<br>- количество потоков MIMO = 8<br>- доля служебно-адресной части = 0.18 |         |         |         |
|                                      | 50 МГц   | 100 МГц | 200 МГц | 400 МГц |
| 60                                   | 1.61   | 3.23    | 6.46    | нет     |
| 120                                  | 1.56   | 3.23    | 6.46    | 12.92   |

пиковая скорость передачи данных не зависит (или почти не зависит) от нумерологии так как при увеличении разности несущих SCS длительность символа уменьшается пропорционально

При агрегации полосы до 1 ГГц пиковая скорость передачи данных теоретически будет равна порядка 30 Гбит/с. Соответственно теоретическая **спектральная эффективность** радиointерфейса NR равна **30 бит/с/Гц**.