

Цифровая обработка сигналов в мобильной связи. Примеры обработки сигналов в системе LTE

Лидия Варукина, к.т.н.

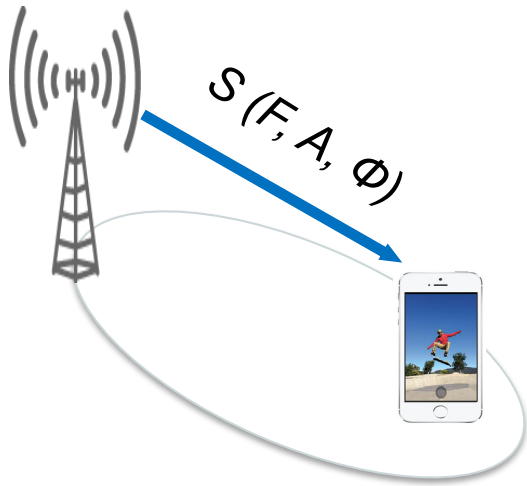
Эксперт по технологиям

Регион Европа

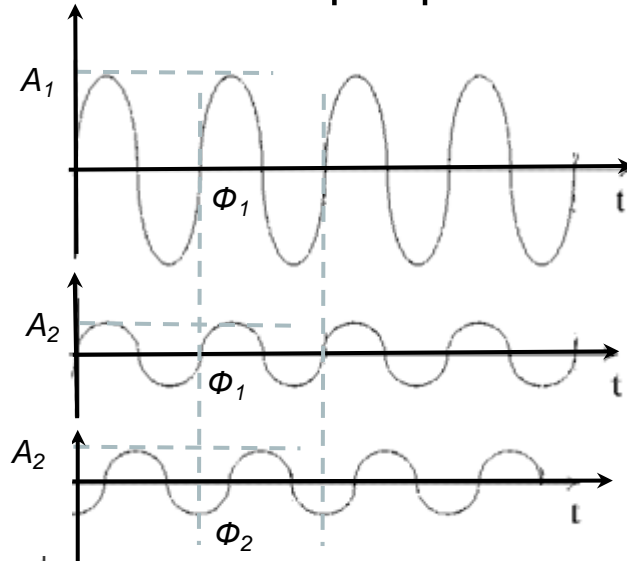
3 июня 2015

Математическое представление радиосигнала

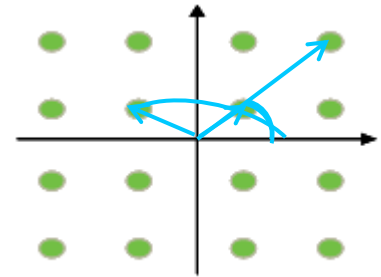
- Переносчик сигнала S — электромагнитное колебание частоты F
- Информация I модулирует амплитуду A и фазу Φ радиосигнала S



$$S(t) = |A| \cdot e^{j(2\pi Ft + \Phi)}$$

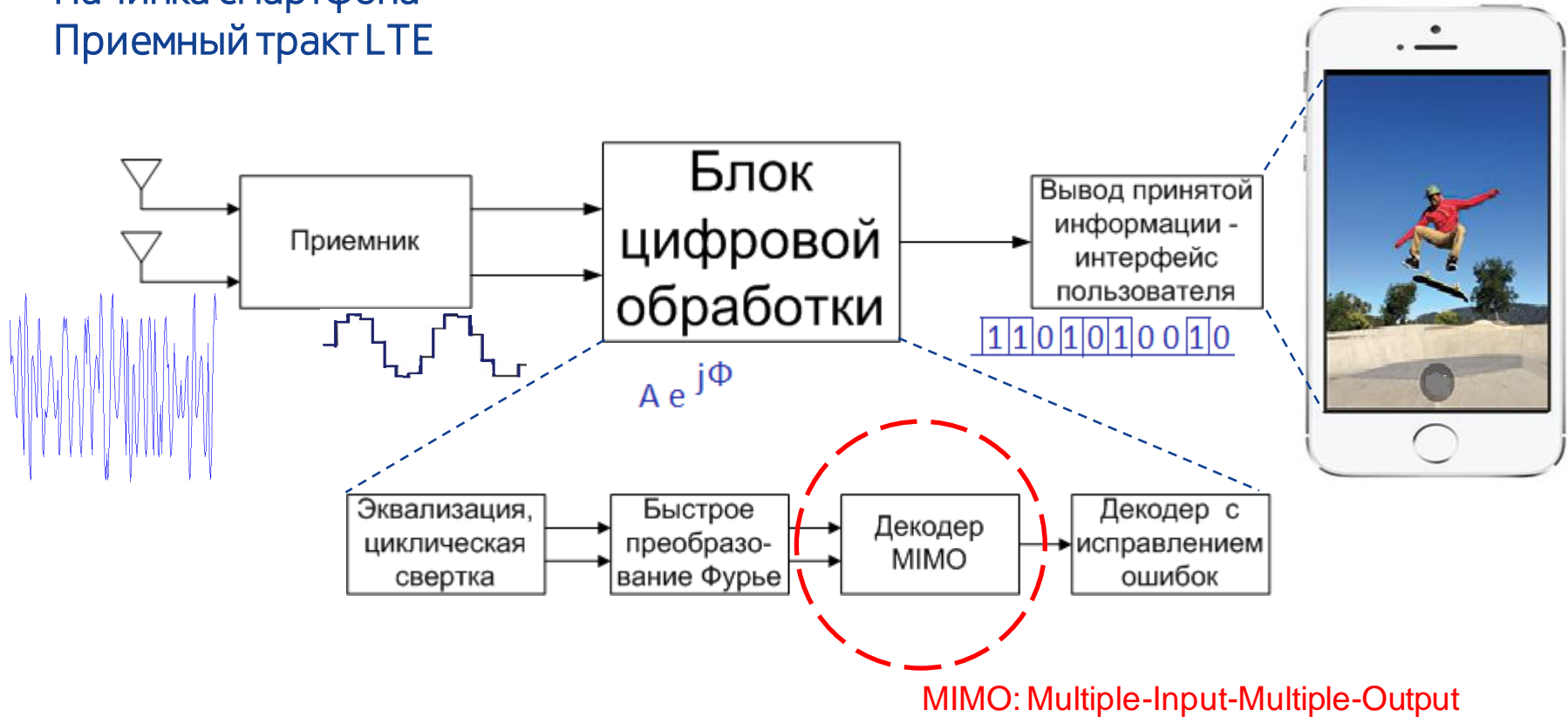


$$I = |A| \cdot e^{j\Phi}$$



Пример алфавита из 16 символов -
16-позиционная квадратурная
амплитудная модуляция (16-QAM)

Начинка смартфона Приемный тракт LTE

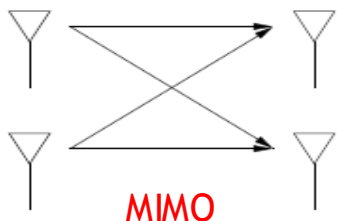


MIMO: Multiple-Input-Multiple-Output

Системы с несколькими передающими и приемными антеннами (MIMO)



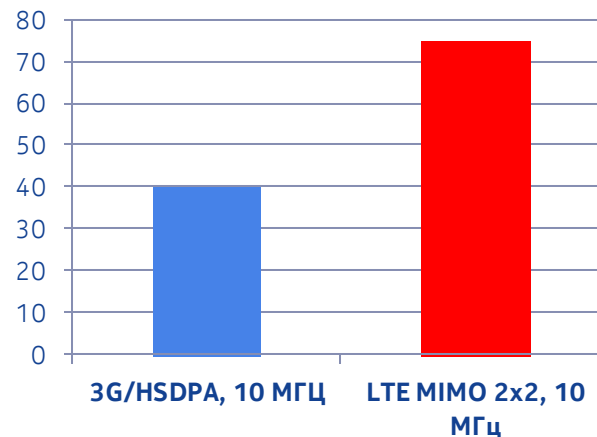
- Один передатчик и один приемник
- Традиционная схема для систем GSM и 3G



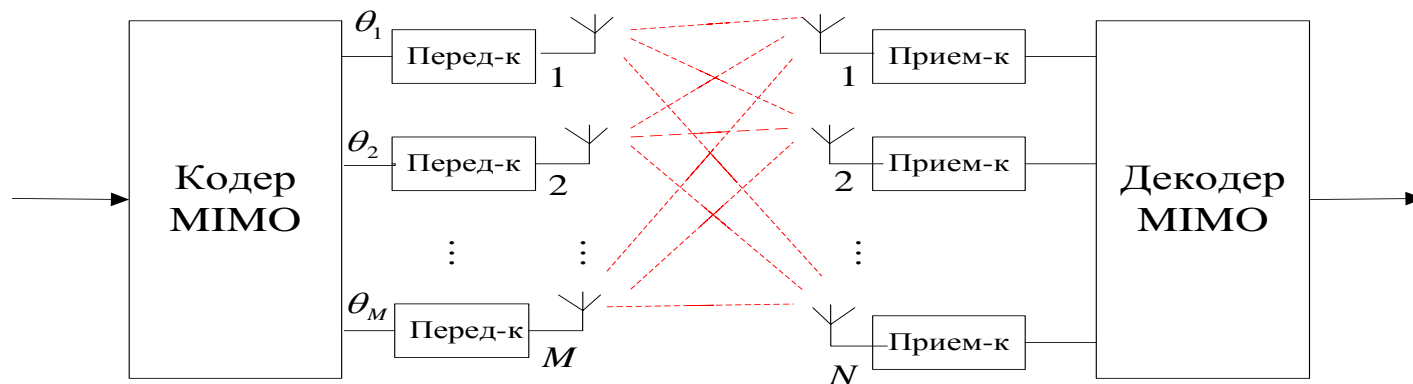
Multiple-Input-Multiple-Output

- Несколько передающих трактов на базовой станции и несколько приемных трактов в абонентском терминале
- Используется в системе LTE, максимальный размер 4x4 (типичная схема MIMO 2x2)
- **Увеличение скорости передачи**

Пиковые скорости, Мбит/с



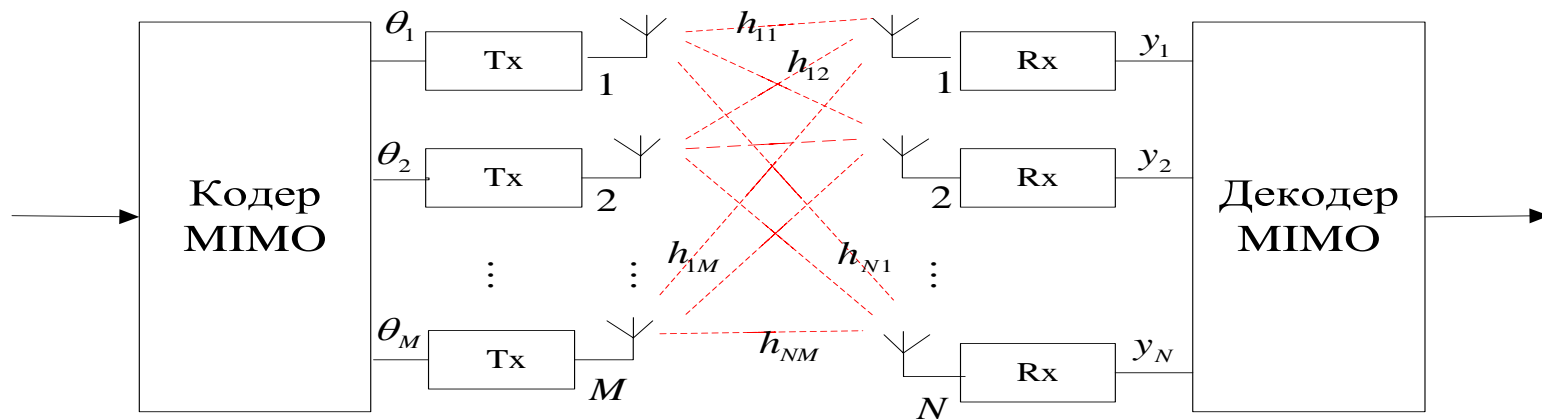
Мультиплексирование сигналов в пространстве



θ_i – информационный символ, передаваемый через i -й тракт

- Сигналы через M антенн передаются одновременно и в одной полосе частот
- Переданные сигналы поступают в N приемных трактов, в каждый из трактов поступает смесь из M переданных сигналов
- Скорость передачи в системе MIMO можно увеличить в M раз по сравнению с системой SISO, если $M \leq N$

Математическая модель системы MIMO



$$\begin{cases} y_1 = h_{11}\theta_1 + h_{12}\theta_2 + \dots + h_{1M}\theta_M + \eta_1 \\ y_2 = h_{21}\theta_1 + h_{22}\theta_2 + \dots + h_{2M}\theta_M + \eta_2 \\ \dots \\ y_N = h_{N1}\theta_1 + h_{N2}\theta_2 + \dots + h_{NM}\theta_M + \eta_N \end{cases}$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{\Theta} + \boldsymbol{\eta}$$

$\boldsymbol{\Theta}$ - переданные символы; \mathbf{H} - матрица коэффициентов канала;
 $\boldsymbol{\eta}$ - шумы в канале

- Процесс декодирования сводится к решению уравнения относительно $\boldsymbol{\Theta}$ при известной матрице канала \mathbf{H} (оценивание канала осуществляется по известным пилот-сигналам)

В системе присутствует случайный шум - традиционные методы решения систем уравнений приводят к ошибкам

Методы декодирования MIMO

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\eta}$$

1. Метод обнуления (Zero Forcing)

Не учитывает характеристики шума

В случае квадратной матрицы канала \mathbf{H} ($M=N$) $\hat{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{Y}$

В общем случае ($M \neq N$) $\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{H}'\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}'\mathbf{Y}$
используется псевдообратная матрица $(\mathbf{H}'\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}'$

2. Метод минимума среднеквадратической ошибки (МСКО) $\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{H}'\mathbf{H} + \sigma^2\mathbf{1})^{-1}\mathbf{H}'\mathbf{Y}$

Учитывает характеристики шума (среднюю мощность σ^2) и позволяет получить более точные оценки

Вычислительная сложность пропорциональна M^3 .

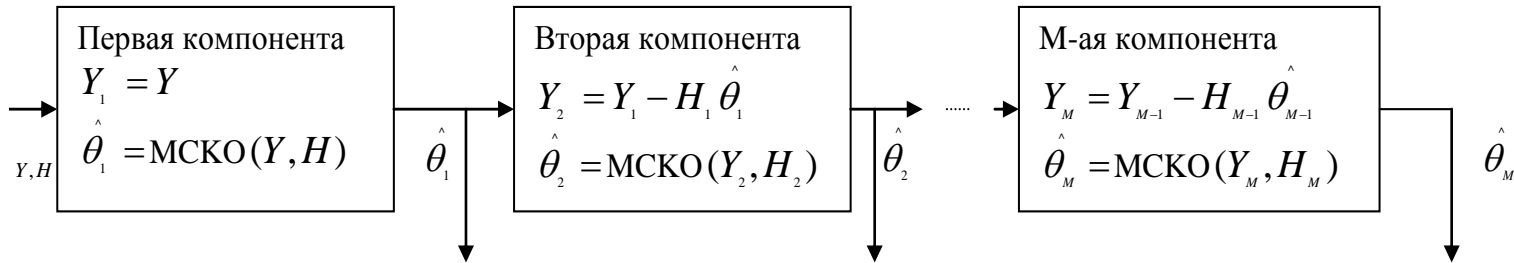
M – число антенн.

Методы декодирования MIMO

3. Метод последовательного исключения декодированных компонент (ПИК)

Каждая компонента вычисляется по методу МСКО

Вычислительная сложность пропорциональна M^4



4. Метод максимального правдоподобия (МП)

Перебор по всем возможным значениям вектора Θ

Вычислительная сложность пропорциональна K^M .

K – число символов в алфавите, M – число антенн.

$$\hat{\Theta} = \arg \min_{\Theta} \|\mathbf{Y} - \mathbf{H}\Theta\|^2$$

Характеристики методов декодирования

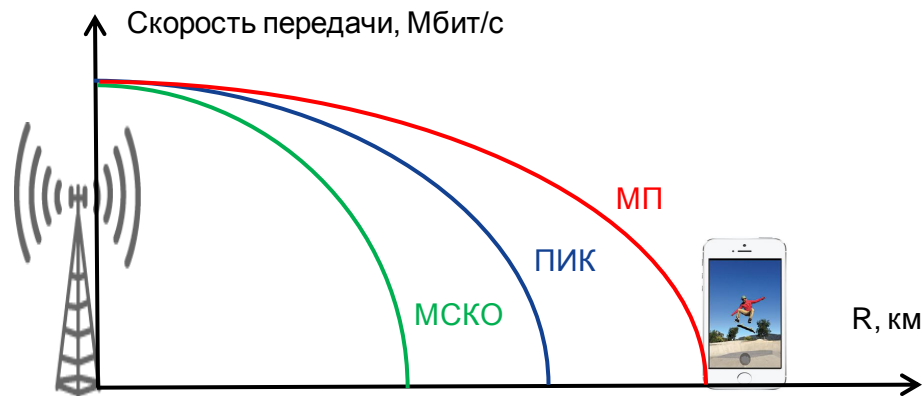
- Метод максимального правдоподобия обеспечивает наилучшие характеристики системы за счет высоких вычислительных затрат
- Реализовать алгоритм в реальном времени, например, для MIMO 4x4 и 64-символьного алфавита, затруднительно, необходимо осуществить перебор $64^4 = 16\,777\,216$ символов на интервале следования одного символа (~ 70 мкс в LTE)

Метод декодирования	МСКО	ПИК	МП
Вычислительная сложность пропорциональна	M^3	M^4	K^M
Число операций при $K=64, M=4$ пропорционально	64	256	16 777 216

МСКО - минимум среднеквадратической ошибки

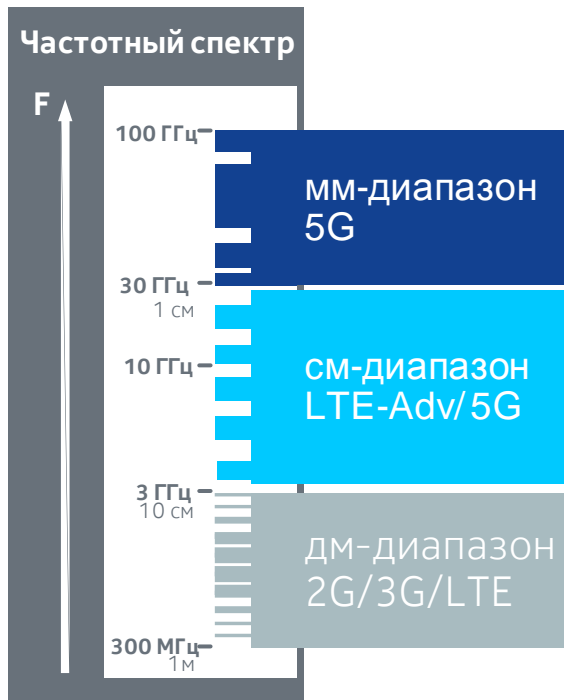
ПИК - последовательное исключение декодированных компонент

МП - максимальное правдоподобие

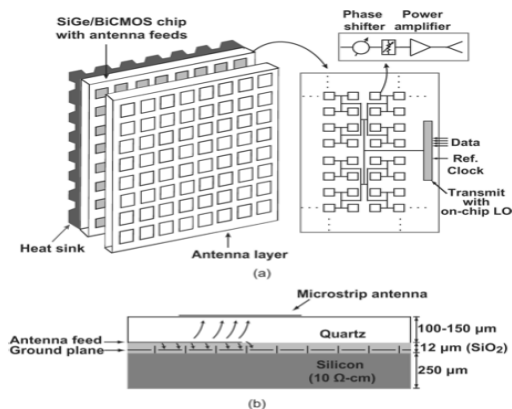


Нужны математические методы декодирования MIMO с малой вычислительной сложностью, по эффективности приближающиеся к характеристиками метода максимального правдоподобия

Задачи следующего десятилетия



- Использование см- и мм-диапазонов частот в 5G
- Размеры антенных элементов сравнимы с размерами кристаллов
- Массивное MIMO $\geq 16 \times 16$
- Расширенный алфавит K ≥ 256

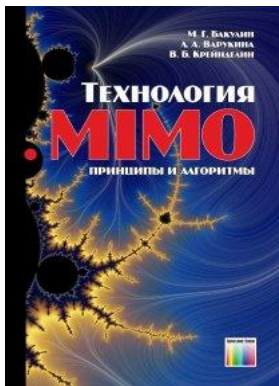


Нужны новые эффективные методы обработки сигналов MIMO

Цифровая обработка сигналов – наука на стыке радиотехники и прикладной математики.

Роль цифровой обработки сигналов в телекоммуникациях возрастает с каждым годом.

Радиотехника + математика = эффективные телекоммуникации



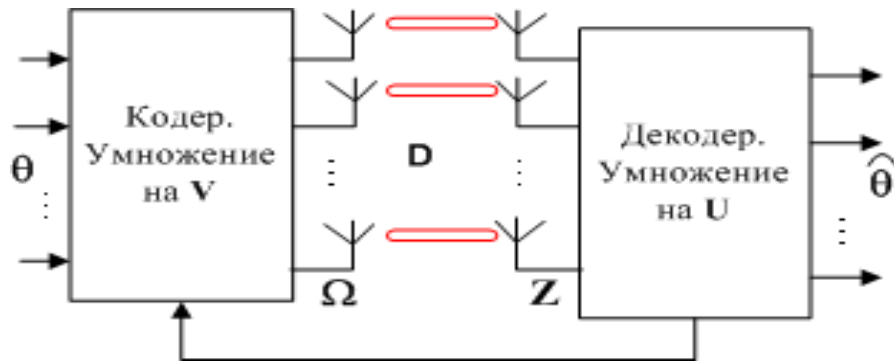
Литература:

Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б.
Технология MIMO: принципы и алгоритмы.
Москва, Горячая Линия – Телеком, 2014

NOKIA

<https://networks.nokia.com/about-us/contact-us>

Пример схемы MIMO с обратной связью



$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\eta}$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\eta}$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{V}\boldsymbol{\theta}$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{U}^{-1}\mathbf{Y}$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{D}\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{U}^{-1}\boldsymbol{\eta}$$

- Передав от приемника к передатчику матрицу канала \mathbf{H} , можно сформировать на передающей и приемной сторонах оптимальные диаграммы направленности

- Сингулярное разложение матрицы канала: $\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}$

где \mathbf{U} и \mathbf{V} - унитарные матрицы; \mathbf{D} - диагональная матрица

- Канал MIMO в эквивалентной системе описывается диагональной матрицей \mathbf{D} , то есть может быть представлен как совокупность неинтерферирующих пространственных каналов $\mathbf{Z} = \mathbf{D}\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{U}^{-1}\boldsymbol{\eta}$

В LTE используется фиксированный набор прекодирующих матриц, абонентский терминал передает на базовую станцию номер выбранной матрицы – согласование системы с каналом неидеальное. Требуется оптимизация.