Ортогональное пространственно-временное блочное кодирование

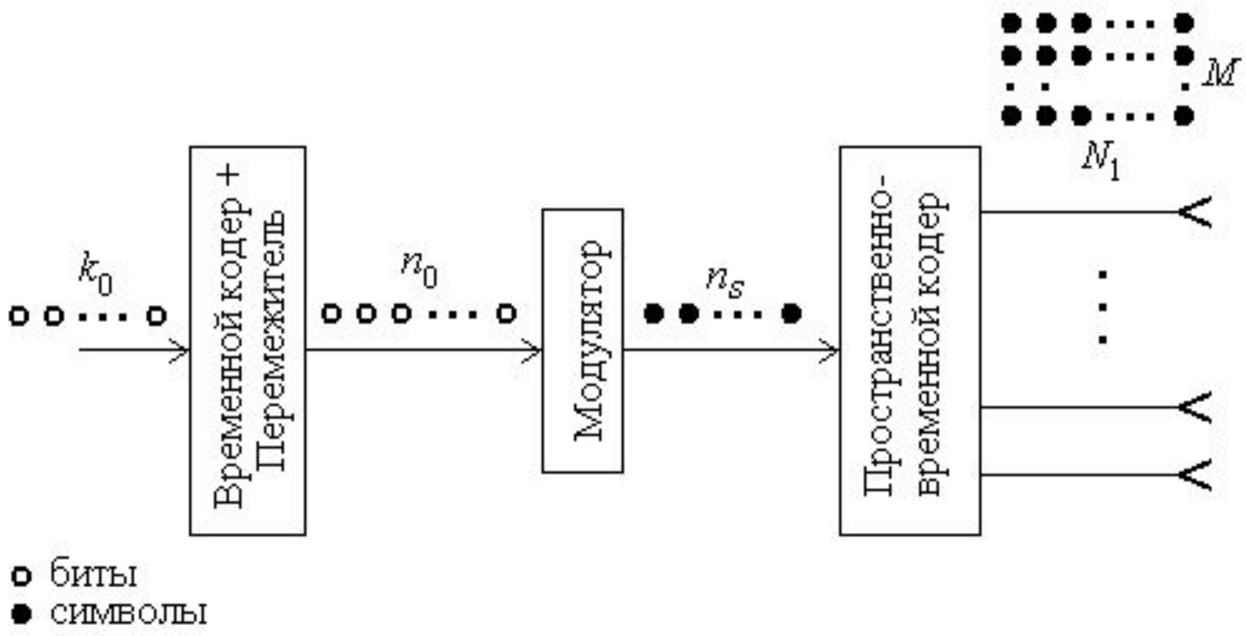


Схема пространственно-временного кодирования

1. Коды при произвольном числе передающих и приемных антенн

Условия ортогональности блочного пространственно-временной кода:

– выходные сигналы кодера есть линейная комбинация входных сигналов и их комплексно-сопряженных величин;

– матрица кодированных сигналов, передаваемых из M антенн за интервал времени $N_1 T_s$, удовлетворяет условию ортогональности

$$\widetilde{\mathbf{D}}\widetilde{\mathbf{D}}^H = \left(|d_1|^2 + |d_2|^2 + \ldots + |d_{n_s}|^2 \right) \mathbf{I}_M$$

- строки матрицы кодированных сигналов ортогональны между собой

1.1. Действительные (одномерные) сигналы (например, сигналы амплитудной модуляции).

Ортогональные блочные коды с единичной скоростью ($R_{s\text{-}t}$=1), то есть без задержки в передаче данных, существуют при произвольном числе M передающих антенн.

Если M четное, то можно сформировать коды, для которых матрица кодированных сигналов является квадратной.

Если M нечетное, то матрица кодированных сигналов становится прямоугольной.

Ортогональные коды для разного числа передающих антенн

M=2 $\quad \widetilde{\mathbf{D}} = \begin{pmatrix} d_1 & -d_2 \\ d_2 & d_1 \end{pmatrix}$

Строки соответствуют передающим антеннам.

Столбцы - моментам времени.

M=4

$$\widetilde{\mathbf{D}} = \begin{pmatrix} d_1 & -d_2 & -d_3 & -d_4 \\ d_2 & d_1 & d_4 & -d_3 \\ d_3 & -d_4 & d_1 & d_2 \\ d_4 & d_3 & -d_2 & d_1 \end{pmatrix}$$

M=3

$$\tilde{\mathbf{D}} = \begin{pmatrix} d_1 & -d_2 & -d_3 & -d_4 \\ d_2 & d_1 & d_4 & -d_3 \\ d_3 & -d_4 & d_1 & d_2 \end{pmatrix}$$

M=5

$$\tilde{\mathbf{D}} = \begin{pmatrix} d_1 & -d_2 & -d_3 & -d_4 & -d_5 & -d_6 & -d_7 & -d_8 \\ d_2 & d_1 & -d_4 & d_3 & -d_6 & d_5 & d_8 & -d_7 \\ d_3 & d_4 & d_1 & -d_2 & -d_7 & -d_8 & d_5 & d_6 \\ d_4 & -d_3 & d_2 & d_1 & -d_8 & d_7 & -d_6 & d_5 \\ d_5 & d_6 & d_7 & d_8 & d_1 & -d_2 & -d_3 & -d_4 \end{pmatrix}$$

Все эти коды удовлетворяют условию ортогональности и обеспечивают передачу данных с единичной скоростью без задержки ($R_{s\text{-}t}$=1).

Пример.

Матрица кода при M=5 состоит из 8 столбцов и 5 строк (блок из 8 символов d_1, d_2, …, d_8 кодируется и передается за 8 моментов времени с помощью 5 антенн).

В схеме пространственно-временного кодирования число выходных символов модулятора n_s=8 (длительность блока на выходе модулятора составляет n_sT_s), длительность кодового слова после кодирования составляет $8T_\mathrm{s}$ (N_1=8). Следовательно, скорость кодирования $R_{s\text{-}t}$=1.

1.2. Комплексные (двумерные) сигналы (например, 4-ФМ, 16-КАМ и 64-КАМ сигналы).

Ортогональные блочные коды с единичной скоростью ($R_{s\text{-}t}$=1), то есть без задержки в передаче данных, существуют только при двух (M=2) передающих антенн.

Если число передающих антенн больше двух (M>2), то не существует ортогональных блочных кодов с единичной скоростью (всегда имеется задержка в передаче данных).

Известные коды обеспечивают скорость $R_{s\text{-}t}$=1/2, то есть длительность передаваемого блока удваивается.

Исключением являются случаи трех (M=3) и четырех (M=4) передающих антенн, когда можно обеспечить большую скорость кодирования, равную $R_{s\text{-}t}$=3/4.

<u>Ортогональные коды для разного числа передающих антенн</u>

***M*=3, *R*$_{s\text{-}t}$=3/4**

$$\tilde{\mathbf{D}} = \begin{pmatrix} d_1 & -d_2^* & \alpha d_3^* & \alpha d_3^* \\ d_2 & d_1^* & \alpha d_3^* & -\alpha d_3^* \\ \alpha d_3 & \alpha d_3 & \alpha^2(-d_1 - d_1^* + d_2 - d_2^*) & \alpha^2(d_2 + d_2^* + d_1 - d_1^*) \end{pmatrix}$$

M=4, $R_{s\text{-}t}$=3/4

$$\tilde{\mathbf{D}} = \begin{pmatrix} d_1 & -d_2^* & \alpha d_3^* & \alpha d_3^* \\ d_2 & d_1^* & \alpha d_3^* & -\alpha d_3^* \\ \alpha d_3 & \alpha d_3 & \alpha^2(-d_1 - d_1^* + d_2 - d_2^*) & \alpha^2(d_2 + d_2^* + d_1 - d_1^*) \\ \alpha d_3 & -\alpha d_3 & \alpha^2(-d_2 - d_2^* + d_1 - d_1^*) & -\alpha^2(d_1 + d_1^* + d_2 - d_2^*) \end{pmatrix}$$

M=3, $R_{s\text{-}t}$=1/2

$$\tilde{\mathbf{D}} = \begin{pmatrix} d_1 & -d_2 & -d_3 & -d_4 & d_1^* & -d_2^* & -d_3^* & -d_4^* \\ d_2 & d_1 & d_4 & -d_3 & d_2^* & d_1^* & d_4^* & -d_3^* \\ d_3 & -d_4 & d_1 & d_2 & d_3^* & -d_4^* & d_1^* & d_2^* \end{pmatrix}$$

M=4, $R_{s\text{-}t}$=1/2

$$\tilde{\mathbf{D}} = \begin{pmatrix} d_1 & -d_2 & -d_3 & -d_4 & d_1^* & -d_2^* & -d_3^* & -d_4^* \\ d_2 & d_1 & d_4 & -d_3 & d_2^* & d_1^* & d_4^* & -d_3^* \\ d_3 & -d_4 & d_1 & d_2 & d_3^* & -d_4^* & d_1^* & d_2^* \\ d_4 & d_3 & -d_2 & d_1 & d_4^* & d_3^* & -d_2^* & d_1^* \end{pmatrix}$$

Эти коды удовлетворяют условию ортогональности и имеют задержку в передаче.

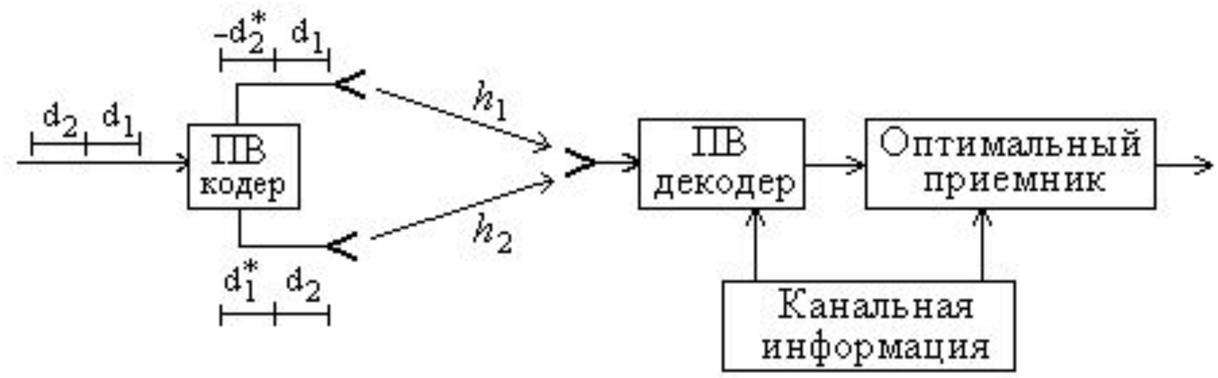
Пример. Матрица кода для M=4 состоит из 8 столбцов и 4 строк (блок из 4 символов d_1, d_2, …, d_4 кодируется и передается за 8 моментов времени с помощью 4 антенн).

В схеме пространственно-временного кодирования число выходных символов модулятора n_s=4 (длительность блока на выходе модулятора составляет n_sT_s), длительность кодового слова после кодирования составляет $8T_\mathrm{s}$ (N_1=8), то есть $R_{s\text{-}t}$=1/2.

2. Вероятность битовой ошибки

2.1. Две передающие и произвольное число приемных антенн.

Пространственно-временная разнесенная передача (схема Аламоути).



$$\mathbf{Y} = \sqrt{P_0}\,\tilde{h}\,\mathbf{D} + \mathbf{Z}$$

$$\tilde{h} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{|h_1|^2 + |h_2|^2}$$ - эффективный канальный коэффициент передачи для каждого из символов d_1 и d_2.

Эффективный коэффициент передачи для i-ой антенны

$$\tilde{h}_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{|h_{i1}|^2 + |h_{i2}|^2}$$

h_{i1} и h_{i2} – коэффициенты передачи между первой и второй передающими антеннами и i-ой приемной антенной.

Две передающие антенны можно заменить одной и считать $\widetilde{h}_i$ коэффициентом передачи между этой эквивалентной антенной и i-ой приемной антенной.

Для когерентного суммирования декодированных сигналов во всех приемных антеннах необходимо сложить эти сигналы с весовыми коэффициентами $\widetilde{h}_i$

ОСШ для символов d_1 и d_2 будет одинаковым
$$\rho = \rho_0 \sum_{i=1}^{N} \left|\widetilde{h}_i\right|^2 = \frac{1}{2}\rho_0 \sum_{i=1}^{N}\left(\left|h_{i1}\right|^2 + \left|h_{i2}\right|^2\right)$$

2.2. Произвольное число передающих антенн.

Эффективный коэффициент передачи для i-й приемной антенны
$$\widetilde{h}_i = \sqrt{\frac{1}{M}}\sqrt{\left|h_{i1}\right|^2 + \left|h_{i2}\right|^2 + \dots + \left|h_{iM}\right|^2} = \sqrt{\frac{1}{M}}\sqrt{\sum_{j=1}^{M}\left|h_{ij}\right|^2}$$

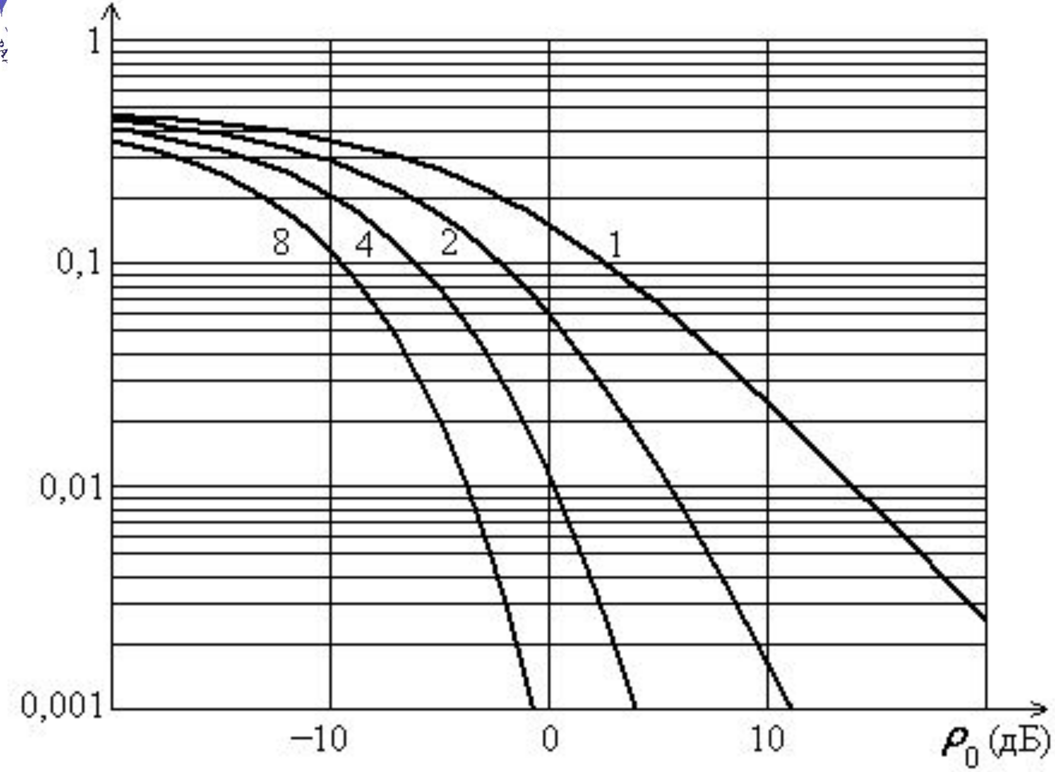
Для когерентного суммирования декодированных сигналов во всех приемных антеннах необходимо сложить эти сигналы с весовыми коэффициентами $\widetilde{h}_i$

ОСШ при произвольном числе передающих и приемных антенн
$$\rho = \rho_0 \sum_{i=1}^{N}\left|\widetilde{h}_i\right|^2 = \frac{\rho_0}{M}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\left|h_{ij}\right|^2 = \frac{\rho_0}{M}\left\|\mathbf{H}\right\|^2$$

Сравним ОСШ для ортогонального пространственно-временного блочного кодирования в системе с M передающими и N приемными антеннами с ОСШ в системе с разнесенным приемом на NM антенн.

$$\rho = \rho_0 \sum_{i=1}^{N} \left|\tilde{h}_i\right|^2 = \frac{\rho_0}{M} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \left|h_{ij}\right|^2 \qquad\qquad \rho = \rho_0 \sum_{p=1}^{NM} \left|h_p\right|^2$$

- ОСШ подчиняются одинаковому закону распределения (хи-квадрат распределение с $2NM$ степенями свободы).
- Ортогональное пространственно-временное блочное кодирование обеспечивает максимальный порядок разнесения, равный общему числу NM некоррелированных ветвей разнесения.
- При больших ОСШ вероятность битовой ошибки при ортогональном блочном кодировании уменьшается обратно пропорционально произведению NM.
- Имеется одно различие, связанное с тем, что среднее ОСШ для такой передачи меньше в $1/M$ раз из-за разделения мощности между передающими антеннами.
- Поэтому кривые вероятности битовой ошибки для ортогонального пространственно-временного блочного кодирования передачи будут смещены на 10 lg(M) дБ вправо по сравнению с соответствующими кривыми для разнесенного приема на NM антенн.



BER для 1, 2, 4 и 8 приемных антенн

Примеры.

1. Если M=2 и N=4, то кривые для BER сдвигаются на 3 дБ.
2. В противном случае (M=4, N=2) мощность разделяется между 4 антеннами, и сдвиг кривых увеличивается до 6 дБ.

Ортогональное пространственно-временное блочное кодирование обеспечивает максимальный порядок разнесения.
Скорость передачи данных либо сохраняется (две передающие антенны), либо уменьшается (M>2) по сравнению с системой без разнесенной передачи.

3. Спектральная эффективность (СЭ)

$$\rho = \rho_0 \sum_{i=1}^{N} \left|\tilde{h}_i\right|^2 = \frac{\rho_0}{M} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \left|h_{ij}\right|^2 = \frac{\rho_0}{M} \|\mathbf{H}\|^2$$

$$C_{ort} = R_{s-t} \log_2\left[1 + \frac{\rho_0}{M}\|\mathbf{H}\|^2\right] = R_{s-t} \log_2\left(1 + \frac{\rho_0}{M}\sum_{i=1}^{K}\lambda_i\right)$$

Сравним СЭ ортогонального пространственно-временного блочного кодирования со СЭ MIMO системы без обратной связи.

$$C = \sum_{i=1}^{K} \log_2\left(1 + \frac{\rho_0}{M}\lambda_i\right) = \log_2 \prod_{i=1}^{K}\left(1 + \frac{\rho_0}{M}\lambda_i\right) = \log_2\left(1 + \frac{\rho_0}{M}\sum_{i=1}^{K}\lambda_i + \frac{\rho_0^2}{M}a + \frac{\rho_0^3}{M}b + \ldots\right) \qquad a > 0,\ b > 0$$

Отсюда $C_{ort} \le C$.

СЭ системы с ортогональным пространственно-временным блочным кодом меньше СЭ MIMO-системы без обратной связи (одинаковое число передающих и приемных антенн и одинаковая канальная матрица H).

<u>Исключение:</u> система с двумя передающими антеннами, когда скорость блочного кода является единичной и $C_{ort} = C$.

Два примера конфигурации MIMO-системы с ортогональным блочным кодом

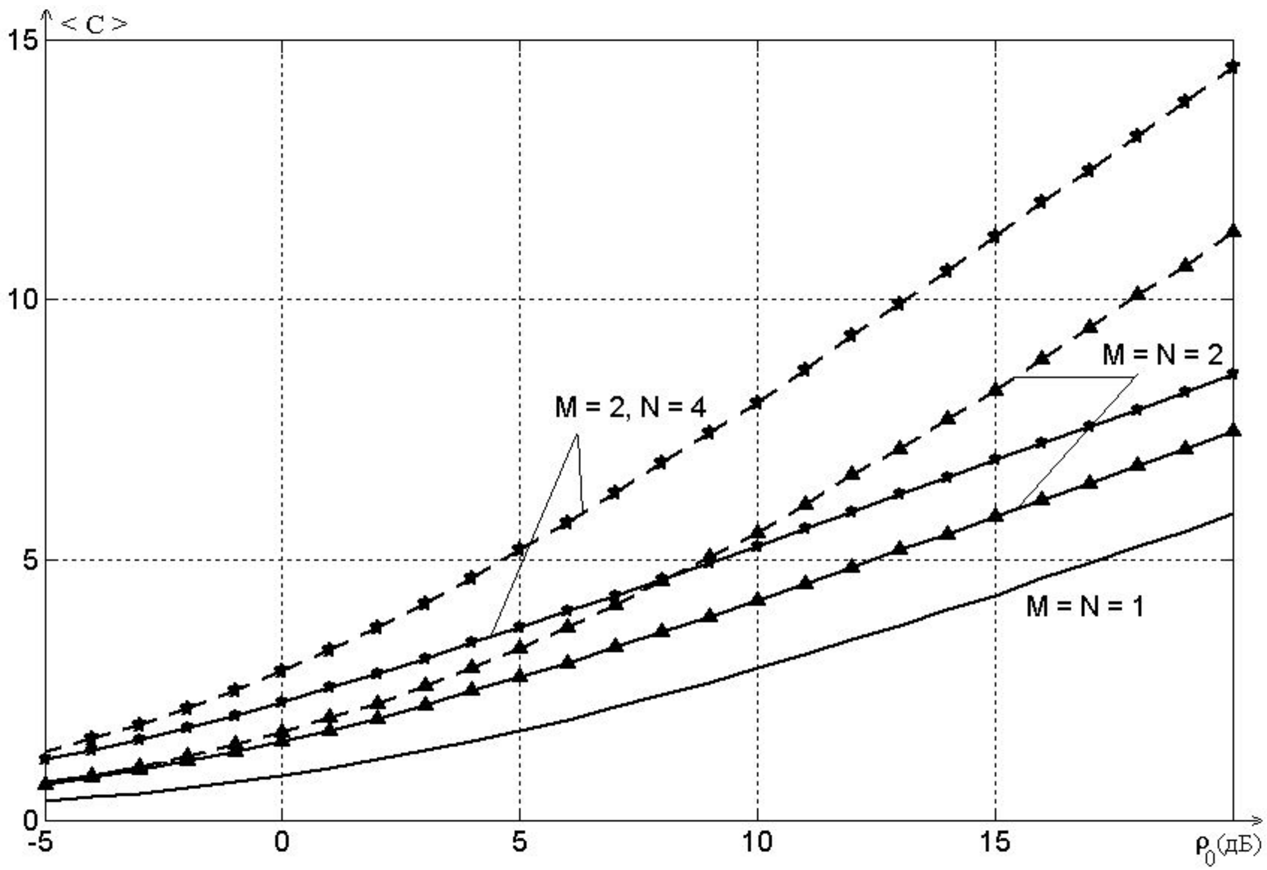
1. Две передающие и одна приемная антенна (M=2, N=1). СЭ

$$C_{ort} = \log_2\left[1 + \frac{1}{2}\rho_0\left(|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2\right)\right]$$

2. Две передающие и две приемные антенны (M=2, N=2). СЭ

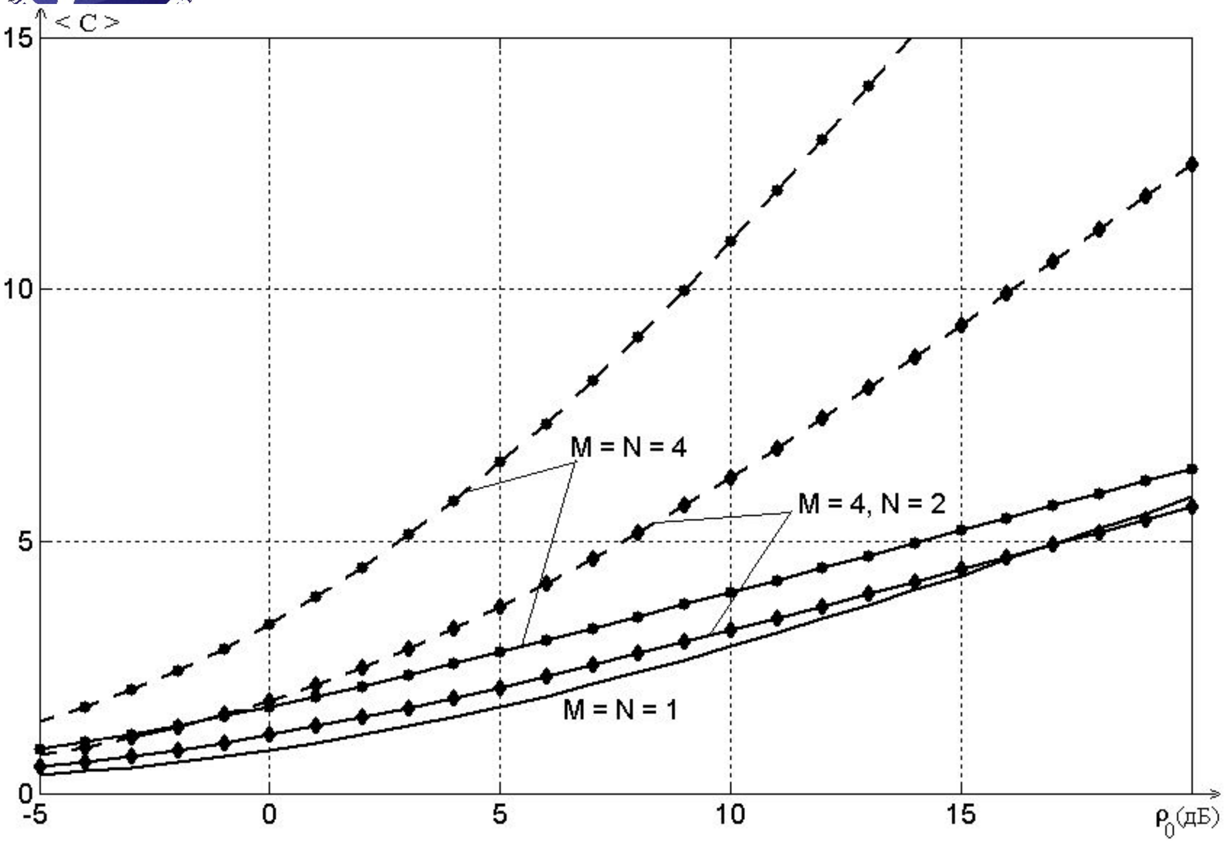
$$C_{ort} = \log_2\left[1 + \frac{1}{2}\rho_0\left(|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{22}|^2\right)\right]$$

Передающих антенн не больше, чем приемных



Средняя СЭ MIMO системы с ортогональным пространственно-временным кодированием (сплошные кривые) и MIMO системы без обратной связи с пространственным кодированием (пунктирные кривые)

Приемных антенн не больше, чем передающих



Средняя СЭ MIMO системы с ортогональным пространственно-временным кодированием (сплошные кривые) и MIMO системы без обратной связи с пространственным кодированием (пунктирные кривые)

Ортогональное блочное пространственно-временное кодирование приводит к уменьшению СЭ, особенно значительному в системах с большим числом передающих антенн

Вопросы к экзамену (январь 2016 г.)

1. Основные характеристики многоэлементных антенных решеток (диаграмма направленности и ее основные параметры, коэффициент направленного действия и усиление антенной решетки).
2. ОСШ на выходе антенной решетки. Оптимальный весовой вектор антенной решетки, максимирующий ОСШ.
3. Максимально правдоподобная оценка корреляционной матрицы входного процесса.
4. Общее описание и основные характеристики сетей GSM. Основные службы GSM. Структура эфирного интерфейса. Карта логических каналов. Широковещательный канал управления (BCCH). Общий (CCCH) и присваиваемый (DCCH) каналы управления.
5. Физический уровень CDMA стандарта IS-95. Схема передачи на базовой станции (downlink). Схема передачи пользователей (uplink). Параметры фрейма. Помехоустойчивые сверточные кодеры. Основные параметры стандарта IS-95.
6. Адаптивное управление мощностью (Power Control – PC). Влияние многолучевости на эффективность CDMA системы. Потенциальная эффективность при идеальном управлении мощностью. Коэффициент увеличения мощности в многолучевом канале.
7. Ортогональное пространственно-временное блочное кодирование. Коды при произвольном числе передающих и приемных антенн. Действительные (одномерные) сигналы. Комплексные (двумерные) сигналы. Вероятность битовой ошибки. Спектральная эффективность.