

УДК 621.391

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МИМО- СИСТЕМЫ



[Ю.Ю. Коляденко](#),

[А.Д. Муслим](#)

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

*Проведено аналіз пропускної здатності МІМО-системи при різній кількості антен на передачу і прийом. Даний аналіз дає можливість забезпечення необхідної пропускної спроможності МІМО-системи на підставі оптимального вибору кількості приймальних і передавальних антен.*

*The analysis of ability the MIMO systems bandwidth is conducted at the different amount of aeri-als on a transmission and reception. This analysis gives by possibility to provide the required ability of the MIMO systems bandwidth on the basis of optimum choice of amount of receiving and transmitter aeri-als.*

*Проведено исследование пропускной способности МІМО-системы при различном количестве антен на передачу и прием. Данный анализ дает возможность обеспечения требуемой пропускной способности МІМО-системы на основании оптимального выбора количества приемных и передающих антенн.*

### Введение

В настоящее время стремительными темпами происходит развитие сетей передачи данных. Это особенно заметно по активным процессам международной стандартизации, производства оборудования и развертывания беспроводных вычислительных сетей. Среди них все большее распространение получают, например, такие технологии как персональные сети IEEE 802.15 (Bluetooth), применяемые для связи компьютера с периферийным оборудованием и локальные сети IEEE 802.11 (Wi-Fi), активно используемые для организации зон общего доступа (hot-spot) в глобальную сеть Интернет. К настоящему моменту также принят и используется международный стандарт универсальных городских сетей IEEE 802.16 (WiMAX), в которых беспроводной широкополосный доступ используется очень широким спектром приложений – от традиционного голосового сервиса до современных мультимедиа-приложений [1, 2].

Наличие общего канала связи, коллективно используемого абонентами (зачастую очень большим их числом), является общей чертой современных и перспективных беспроводных телекоммуникационных систем. Вызванная практикой необходимость обеспечения максимально эффективного использования ограниченного ресурса беспроводного канала большим числом абонентов определяет огромный интерес и актуальность исследований в области анализа помехоустойчивости и электромагнитной совместимости таких систем. В системах WiMAX кроме канального кодирования, адаптивного выбора метода модуляции 16-QAM, 64-QAM, QPSK

или 256-OFDM и регулировки мощностью передатчика для обеспечения помехоустойчивости не предусмотрены другие механизмы. Все разработки в системах WiMAX направлены на повышение скорости передачи в том числе и использование MIMO технологии.

## I. Постановка задачи

*Цель работы* – обеспечение требуемой пропускной способности MIMO-системы на основании оптимального выбора количества приемных и передающих антенн.

Для достижения высоких скоростей передачи данных в современных стационарных и подвижных системах связи используют многоантенную технику. В системах с несколькими пространственными каналами как в передатчике, так и в приемнике используются несколько антенн. Их часто называют системами с многими входами и многими выходами (MIMO – Multiple Input Multiple Output). Считается, что при использовании MIMO системы можно получить скорости передачи информации, близкие к предельным, если параметры канала известны в передатчике.

В MIMO-системе связи с  $N_t$  передающими и  $N_r$  приемными антеннами при  $N_t \leq N_r$  входной поток данных  $d$  делится на  $N_t$  подпотоков [1].

Последовательно-параллельный демультимплексор выполняет это разделение. Каждый подпоток после кодирования и модуляции излучается отдельной антенной. Все  $N_t$  подпотоков излучаются одновременно в одной и той же полосе частот. Для всех подпотоков могут использоваться идентичные коды и модуляторы.

Излученные  $N_t$  потоков создают сигналы в каждой из  $N_r$  приемных антенн, т.е. сигнал в каждой приемной антенне – это смесь  $N_t$  излученных сигналов, умноженных на комплексные передаточные функции (феддинги) от соответствующих передающих антенн к рассматриваемой приемной антенне. Иначе говоря, вектор принятых сигналов  $r$  представляет произведение матрицы канала  $H$  на вектор излученных сигналов  $d$ :  $r(t) = Hd(t)$ .

На практике для обеспечения требуемой пропускной способности MIMO-системы необходим выбор антенной системы, т.е. оптимальный выбор количества приемных и передающих антенн. Данная работа как раз и направлена на решение актуальной научной задачи на анализ зависимости пропускной способности от количества антенн на передачу и прием.

## II. Основная часть

Формула Шеннона для расчета удельной пропускной способности SISO-системы с одним пространственным каналом

$$C = \log_2(1 + h^2). \quad (1)$$

В формуле (1)  $C$  – удельная пропускная способность, измеряемая в бит/с • Гц. Это максимальное количество бит, которые можно передать за одну секунду со сколь

угодно малой вероятностью ошибки в полосе частот 1 Гц. Через  $h^2$  обозначено отношение мощности сигнала на входе приемника к мощности шума.

Для удельной пропускной способности ММО-системы с  $N_t$  передающими и  $N_r$  приемными антеннами справедлива следующая зависимость [1,2]:

$$C = \sum_{nt=1}^{N_t} \log_2(1 + h_{nt}^2 \lambda_{nt}). \quad (2)$$

Входящие в формулу (2) величины  $\lambda_{nt}$  — это собственные значения матрицы  $H^H H$ , т. е. величины, которые удовлетворяют уравнению

$$H^H H U = \lambda U. \quad (3)$$

В (3)  $U$  — это собственный вектор матрицы  $H^H H$ . Через  $H^H$  обозначена эрмитово сопряженная матрица, т. е. комплексно сопряженная и транспонированная. Известно, что все собственные значения матрицы  $H^H H$  неотрицательны.

ММО-система эквивалентна  $N_t$ -канальной системе связи. Ее пропускная способность определяется суммой  $N_t$  слагаемых. Отношение мощности сигнала к мощности шума в канале с номером  $nt$  зависит от доли мощности, направляемой в этот канал при передаче (от  $h_{nt}^2$ ) и от значения  $\lambda_{nt}$ . Величина  $\lambda_{nt}$  равна коэффициенту передачи по мощности соответствующего пространственного канала.

При равномерном распределении мощности между всеми пространственными каналами выражение (2) принимает вид:

$$C = \sum_{nt=1}^{N_t} \log_2\left(1 + \frac{h_{nt}^2}{N_t} \lambda_{nt}\right). \quad (4)$$

Вместо формулы (4) можно пользоваться эквивалентной ей формулой

$$C = \log_2 \det\left(I + \frac{h_{nt}^2}{N_t} H^H H\right). \quad (5)$$

В (5)  $I$  — единичная  $N_t \times N_t$  матрица и через **det** обозначен определитель записанной в скобках матрицы. Последняя формула позволяет вычислять удельную пропускную способность без вычисления собственных значений.

Анализ проводился с помощью математического моделирования в среде Matlab. Моделирование выполнено в предположении, что все  $N_t \times N_r$  федингов между  $N_t$  передающими и  $N_r$  приемными антеннами представляют независимые релейские фединги. То есть комплексный коэффициент передачи из любой передающей антенны в любую приемную — это комплексная случайная величина. Средние значения действительной и мнимой частей ее полагаются равными нулю, а их дисперсии по 1/2. Суммарная дисперсия действительной и мнимой частей при этом равна 1, т. е. матрица канала полагается нормированной так, что средняя мощность полезного сигнала на выходе каждой приемной антенны равна мощности, излучаемой передающей антенной. Изменения уровня сигнала при его распространении

учитываются отношением сигнал/шум ( $h^2$ ). Полагается, что на выходе канала в каждом элементе приемной антенны к принятому сигналу добавляется комплексный шум

$$r(t) = Hd(t) + n(t), \quad (6)$$

где  $t$  — дискретное время;  $r(t)$  — вектор размерности  $N_r$ ;  $d(t)$  — вектор размерности  $N_t$ ;  $n(t)$  —  $N_r$ -мерный комплексный вектор шума;  $H$  — матрица канала размерности  $N_r \times N_t$ .

Дисперсия действительной и мнимой частей шума полагается равной  $\frac{\sigma^2}{2}$ .

При этих предположениях рассчитывается зависимость удельной пропускной способности системы связи от отношения сигнал/шум  $C(h^2)$ . Удельная пропускная способность — это максимально возможная скорость безошибочной передачи информации, приходящаяся на 1 Гц полосы частот, измеряемая в бит/с•Гц. При моделировании для получения матрицы  $H$  генерировались  $N_r \times N_t$  случайных чисел, затем по формуле (4) или (5) вычислялось значение  $C$ . Эта процедура многократно повторялась для различных случайных матриц  $H$  и вычислялось среднее значение удельной пропускной способности, которое наносилось на график зависимости  $C(h^2)$ .

Результаты моделирования приведены на рис. 1 и рис. 2.

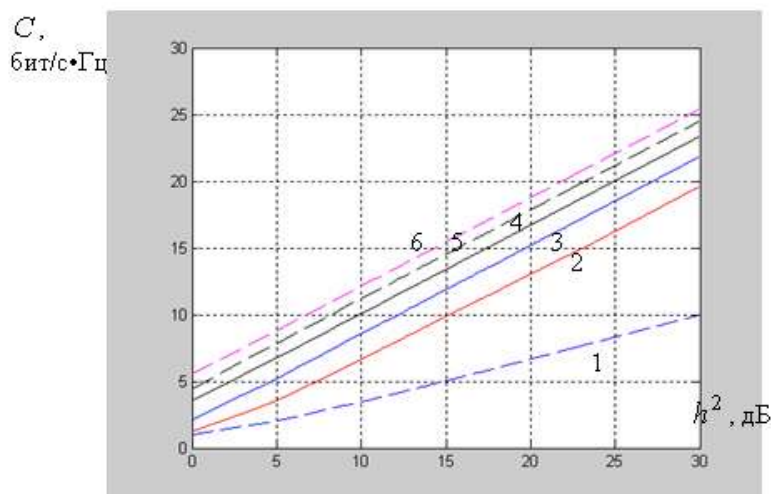


Рис. 1. Зависимости пропускной способности от  $h^2$  для MIMO-систем с двумя передающими ( $N_t = 2$ ) и с различным числом приемных антенн ( $N_r = 2, 4, 8, 16, 32$ )

На рис. 1 приведены графики зависимости пропускной способности от  $h^2$  для MIMO-систем с двумя передающими ( $N_t = 2$ ) и с различным числом приемных антенн  $N_r = 2$  (кривая 2),  $N_r = 4$  (кривая 3),  $N_r = 8$  (кривая 4),  $N_r = 16$  (кривая 5),  $N_r = 32$  (кривая 6). Для сравнения на графике приведена кривая для SISO системы ( $N_t = N_r = 1$ ) (кривая 1). Сравнение приведенных кривых показывает, что переход от SISO си-

стемы к ММО дает значительное увеличение скорости передачи информации и это увеличение тем больше, чем больше число приемных антенн.

Выигрыш, получаемый при увеличении числа приемных антенн, можно характеризовать величиной уменьшения  $h^2$  в децибелах, при котором получается прежняя пропускная способность. Из рисунка видно, что пять приведенных кривых для ММО-систем приблизительно совмещаются при смещении кривой для  $N_t = 2, N_r = 16$  влево на -2 дБ, при смещении кривой для  $N_t = 2, N_r = 8$  влево на -3 дБ, при смещении кривой для  $N_t = 2, N_r = 4$  влево на -6 дБ, при смещении кривой для  $N_t = 2, N_r = 2$  влево на -8 дБ. То есть в ММО-системе с двумя передающими антеннами переход от 16 приемных антенн к 32 дает выигрыш примерно 2 дБ, переход от восьми приемных антенн к 32 дает выигрыш  $\approx 3$  дБ, переход от 4-х приемным антеннам к 32 дает выигрыш  $\approx 6$  дБ, а переход от 2-х приемных антенн к 32 – примерно 8 дБ.

Из приведенных графиков рис. 1 также видно, что рост пропускной способности зависит нелинейно от количества приемных антенн. Поэтому нами проведены исследования по данной зависимости.

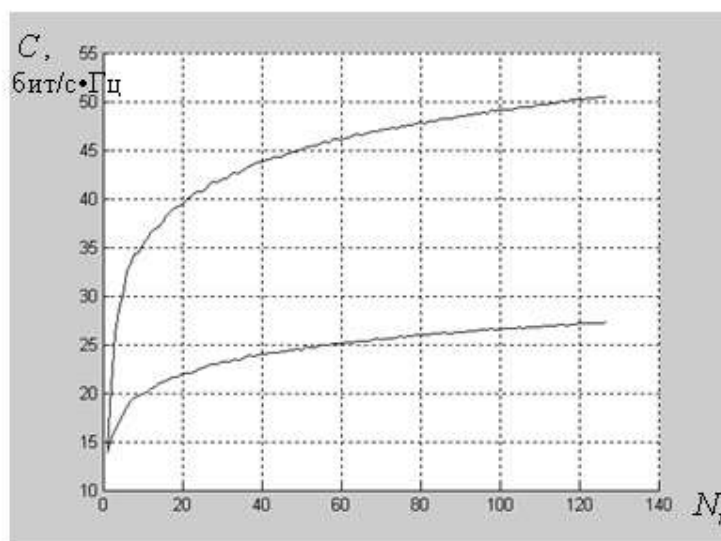


Рис. 2. Зависимости пропускной способности ММО системы от количества приемных антенн при количестве передающих антенн  $N_t = 2$  (нижняя кривая) и  $N_t = 4$  (верхняя кривая)

На рис. 2 представлены зависимости пропускной способности ММО системы от количества приемных антенн при количестве передающих антенн  $N_t = 2$  (нижняя кривая) и  $N_t = 4$  (верхняя кривая). Судя по данным зависимостям, можно сказать, что при изменении количества приемных антенн от 2-х до 20-ти наблюдается экспоненциальное увеличение пропускной способности. И при дальнейшем увеличении антенн рост становится практически линейным. Из данных графиков также видно, что пропускная способность зависит больше от количества передающих антенн. Так при небольшом увеличении количества передающих антенн (от 2-х до 4-х) можно

получить такой же выигрыш в пропускной способности, как при увеличении количества приемных антенн от 4-х до 60.

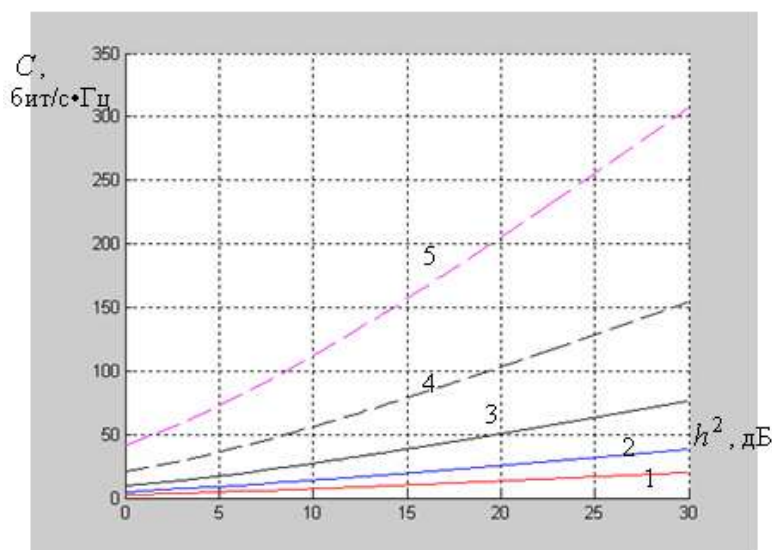


Рис. 3. Зависимости пропускной способности от  $h^2$  для MIMO-систем с различным числом передающих антенн и приемных антенн ( $N_t = N_r = 2, 4, 8, 16, 32$ )

На рис. 3 представлены зависимости пропускной способности от  $h^2$  для MIMO-системы, когда число приемных антенн равно числу передающих ( $N_t = N_r = N$ ). Кривая 1 соответствует случаю  $N_t = N_r = 2$ , кривая 2 построена для  $N_t = N_r = 4$ , кривая 3 соответствует случаю  $N_t = N_r = 8$ , кривая 4 соответствует случаю  $N_t = N_r = 16$ , кривая 5 соответствует случаю  $N_t = N_r = 32$ . Приведенные графики показывают, что пропускная способность растет с ростом числа антенн. Можно заметить, что пропускная способность  $N_t = N_r = N$  MIMO-системы приблизительно в  $N$  раз больше пропускной способности 1x1 SISO-системы (по крайней мере, для больших  $h^2$ ).

## Заключение

На практике для обеспечения требуемой пропускной способности MIMO-системы необходим выбор антенной системы, т.е. оптимального выбора количества приемных и передающих антенн. Проведенные исследования выявили следующие закономерности:

1. Переход от SISO системы к MIMO дает значительное увеличение скорости передачи информации. Пропускная способность MIMO-системы при одинаковом количестве передающих и приемных антенн  $N_t = N_r = N$  в  $N$  раз больше пропускной способности SISO-системы (по крайней мере, для больших  $h^2$ ).

2. Рост пропускной способности зависит нелинейно от количества приемных антенн. При изменении количества приемных антенн от 2-х до 20-ти наблюдается

экспоненциальное увеличение пропускной способности. И при дальнейшем увеличении приемных антенн рост становится практически линейным.

3. Пропускная способность зависит больше от количества передающих антенн. Так при увеличении количества передающих антенн от 2-х до 4-х можно получить такой же выигрыш в пропускной способности, как при увеличении количества приемных антенн от 4-х до 60.

### **Список литературы:**

1. Сюваткин В. С., Есипенко В. И., Ковалев И. П., Сухоребров В. Г. WiMAX — технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение. / Под ред. В. В. Крылова. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 368 с.
2. Shiu D.S., Fouchini G. J., Gans M.J., Kahn J.M. Fading Con-elation and Its Effect on the Capacity of Multielement Antenna Systems // IEEE Trans. On Commun. 2000. – Vol. 48. – No. 3. – P. 502–513.