

УДК 621.371

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ АВТОВЫБОРА АНТЕНН В СИСТЕМАХ MIMO В СРАВНЕНИИ С БАЗОВОЙ СИСТЕМОЙ MIMO БЕЗ АВТОВЫБОРА АНТЕНН

Крейнделин В.Б., д.т.н, проф., зав. кафедрой МТУСИ, e-mail: vitkrend@gmail.com;

Хазов М.Л., соискатель МТУСИ, e-mail: mikekhazov@mail.ru.

THE ADVANTAGES OF ANTENNA SELECTION IN MIMO SYSTEMS IN ORDER TO CLASSICAL MIMO SYSTEMS WITHOUT ANTENNA SELECTION

Kreyndelin V.B., Khazov M.L.

The article presents a comparative analysis of noise resistance of traditional communication systems with many transmitting and many receiving antennas (Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO) with MIMO systems that use auto-selection of antennas (Antenna Selection) at the reception and transmission sides. In MIMO systems with antenna selection, the number of transmitting antennas and the number of receiving antennas are greater than the number of radio channels on both sides. Selection of antennas is carried out by one of the algorithms using a given optimization criterion.

Statistical simulations show that MIMO systems with antenna selection provide a significant energy gain compared to conventional MIMO systems without antenna selection.

Key words: MIMO, spectral efficiency, noise resistance, antenna selection, communication channel capacity, radio channel, optimization criterion.

Ключевые слова: MIMO, спектральная эффективность, помехоустойчивость, выбор антенн, пропускная способность канала связи, радиотракт, критерий оптимизации.

Введение

Технология MIMO позволяет существенно увеличить скорость передачи информации в системах беспроводной связи, не прибегая при этом к расширению занимаемой системой полосы частот или увеличению мощности передатчика [1].

При использовании технологии MIMO с пространственным мультиплексированием скоростной поток передаваемых информационных символов разделяется на множество низкоскоростных подпотоков, передаваемых одновременно с помощью разных антенн. Традиционная система MIMO имеет число передающих/приемных радиотрактов, равное числу передающих/приемных антенн, соответственно. Передача и прием полезного сигнала осуществляется одновременно по всем передающим и приемным антеннам одновременно на одной и той же частоте.

При добавлении в систему дополнительной антенны вместе с соответствующим дополнительным радиотрактом помехоустойчивость приема информации увеличивается. Однако, такое добавление существенно увеличивает стоимость и сложность реализации системы связи.

Основной вклад в стоимость и сложность системы связи вносят именно радиотракты, поэтому желательным является сокращение их числа. Поэтому весьма перспективным является использование алгоритмов автовыбора антенн (Antenna Selection), которые позво-

В статье проведен сравнительный анализ помехоустойчивости традиционных систем связи со многими передающими и многими приемными антеннами (Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO) с системами MIMO, использующими автовыбор антенн (Antenna Selection) на приеме и на передаче. В системах MIMO с автовыбором антенн число передающих антенн и число приемных антенн больше, чем число передающих трактов и число приемных трактов, соответственно. Выбор антенн в каждом отдельном случае осуществляется по одному из алгоритмов с использованием заданного критерия оптимизации.

Путем статистического моделирования показано, что системы MIMO с автовыбором антенн позволяют получить существенный энергетический выигрыш по сравнению с обычными системами MIMO без автовыбора антенн. Дана количественная оценка данного энергетического выигрыша для различных условий и для различных критериев автовыбора антенн.

ляют выбирать некоторое подмножество передающих/приемных антенн из имеющихся передающих/приемных антенн [2], [3], [4]. Весьма важно при разработке конкретных систем связи MIMO иметь количественные оценки помехоустойчивости различных алгоритмов автовыбора антенн в различных условиях. Это позволяет нам убедиться в том, что экономия при реализации системы связи в действительности будет оправдана. Кроме того, в случае с автовыбором антенн можно получить существенный энергетический выигрыш в системе связи, используя соответствующий алгоритм автовыбора с заданным критерием оптимальности (критерием выбора антенн).

Настоящая статья посвящена исследованию алгоритмов автовыбора антенн в системах MIMO, использующих различные критерии выбора антенн.

Автовывбор антенн. Критерии выбора антенн

Кратко опишем модель системы MIMO без автовывбора антенн. Для этого будем рассматривать систему MIMO, в которой имеется N передающих антенн и M приемных антенн. Будем также считать, что число приемных радиотрактов равно L , а число передающих радиотрактов равно P .

В случае $L = M$ и $P = N$ автовывбор антенн отсутствует и модель системы MIMO описывается следующим традиционным уравнением [1], [5], [6]:

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{\rho}{N}} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{s} + \boldsymbol{\eta} \quad (1)$$

где $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$ – вектор комплексных отсчетов наблюдения, размерности $M \times 1$; $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_N]^T$ – вектор передаваемых QAM символов, размерности $N \times 1$; ρ – среднее отношение сигнал/шум для каждой приемной антенны, $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_M]^T$ – вектор комплексных отсчетов аддитивного белого гауссовского шума с нулевым средним и единичной корреляционной матрицей; \mathbf{H} – комплексная матрица канала MIMO размерности $M \times N$:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

где h_{ij} – комплексный коэффициент передачи канала между i -й приемной и j -й передающей антеннами. Коэффициенты h_{ij} являются некоррелированными комплексными гауссовскими случайными величинами с нулевыми средними и с единичными дисперсиями.

Система MIMO, описываемая уравнением (1), является традиционной системой MIMO без автовывбора антенн. В этой системе число радиотрактов передачи равно числу передающих антенн, а число радиотрактов приема равно числу приемных антенн.

Далее рассмотрим модель системы MIMO с автовывбором антенн (Antenna Selection). Будем предполагать, что в системе MIMO имеется P ($P < N$) передающих радиотрактов и L ($L < M$) приемных радиотрактов.

Модель такой системы описывается следующим уравнением [0], [0]:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \sqrt{\frac{\rho}{P}} \cdot \tilde{\mathbf{H}} \cdot \mathbf{s} + \tilde{\boldsymbol{\eta}} \quad (3)$$

где $\tilde{\mathbf{y}} = [y_1, y_2, \dots, y_L]^T$ – вектор принимаемого сигнала, содержащий отсчеты сигнала со всех выбранных приемных антенн, размерности $L \times 1$; $\tilde{\mathbf{H}}$ – комплексная подматрица канала размерности $L \times P$; $\tilde{\boldsymbol{\eta}}$ – комплексный подвектор аддитивного белого гауссовского шума размерности $L \times 1$, имеющий нулевое среднее и единичную корреляционную матрицу. Матрица $\tilde{\mathbf{H}}$ содержит элементы полной матрицы канала \mathbf{H} , соответствующие выбранным L приемным антеннам из M имеющихся приемных антенн, и выбранным P передающим антеннам из N имеющихся передающих антенн.

Известны следующие критерии оптимальности, применяемые при построении алгоритмов автовывбора антенн в системах MIMO [2], [4], [7].

Критерий максимума пропускной способности. Здесь производится такой выбор подмножества из P антенн из N имеющихся передающих антенн и подмножества из L антенн из M имеющихся приемных антенн, чтобы обеспечить максимум удельной пропускной способности C_{\max} :

$$C_{\max} = \max_{\tilde{\mathbf{H}}} \log_2 \det \left(\mathbf{1} + \frac{\rho}{P} \cdot \tilde{\mathbf{H}} \cdot \tilde{\mathbf{H}}' \right). \quad (4)$$

Критерий максимума отношения сигнал/шум. Указанный критерий сводится к критерию максимума нормы Фробениуса $\|\tilde{\mathbf{H}}\|_F^2$ выбранной матрицы канала $\tilde{\mathbf{H}}$:

$$\max_{\tilde{\mathbf{H}}} \|\tilde{\mathbf{H}}\|_F^2 = \max_{\tilde{\mathbf{H}}} \sum_{m=1}^L \sum_{n=1}^P |\tilde{h}_{mn}|^2. \quad (5)$$

Критерий минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции. В работе [7] предложен следующий критерий:

$$\min_{\tilde{\mathbf{H}}} \text{tr} \left(\left(\frac{\rho}{P} \cdot \tilde{\mathbf{H}} \cdot \tilde{\mathbf{H}} + \mathbf{1} \right)^{-1} \right). \quad (6)$$

Следует отметить, что критерий (5) не учитывает информацию о значении отношения сигнал/шум ρ , в то время как критерии (4) и (6) эту информацию учитывают. Указанные критерии позволяют реализовать автовывбор антенн как на передающей, так и на приемной стороне.

Проведем сравнительный анализ эффективности системы MIMO с автовывбором антенн по сравнению с традиционной системой MIMO без автовывбора антенн.

Помехоустойчивость системы MIMO с автовывбором антенн в условиях некоррелированных замираний

Анализ эффективности алгоритмов был проведен методом статистического моделирования. Моделирование проводилось при следующих общих условиях:

- метод модуляции – QPSK;
- метод демодуляции – MMSE;
- вид помехоустойчивого кодирования – Турбокодирование (скорость – 1/2, число итераций декодирования – 4);
- исследуемые алгоритмы автовывбора антенн:
 - критерий максимума пропускной способности (4) (OptDet);
 - критерий максимума отношения сигнал/шум (5) (Frob);
 - критерий минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции (6) (MinTrVzf);
- матрица канала \mathbf{H} точно известна на приемной стороне;
- число передающих антенн $N = 4$;
- число приемных антенн $M = 4$;
- число передающих радиотрактов $P = 4$;
- число приемных радиотрактов $L = 4$;
- вид замираний в канале связи MIMO – Релеевские, пространственная корреляция отсутствует;

- длина кадра – 573 бита;
- число экспериментов – 100000.

На рис. 1 показаны зависимости коэффициента ошибок на бит (BER) от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для случая традиционной системы MIMO (автовывбор антенн отсутствует). Из рис. 1 видно, что все три кривые для различных критериев автовывбора антенн совпадают, что совершенно естественно, т.к. в данной системе автовывбор антенн отсутствует.

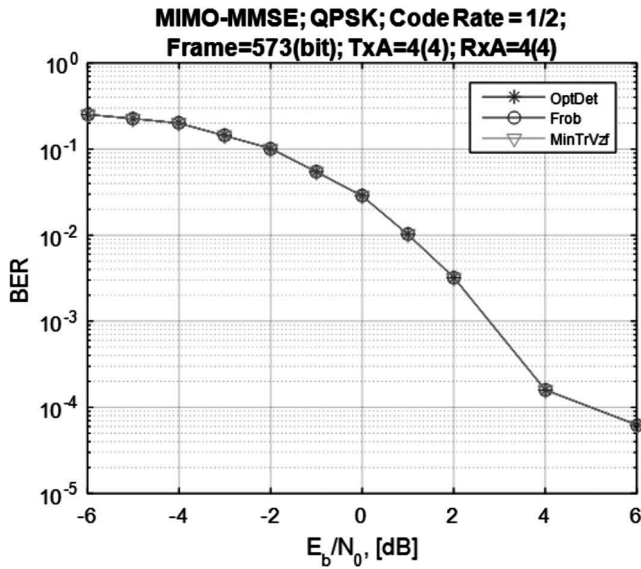


Рис. 1. Помехоустойчивость традиционной системы MIMO (без автовывбора антенн, модуляция QPSK)

На рис. 2 показаны зависимости коэффициента ошибок на бит (BER) от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для случая системы MIMO с автовывбором антенн (число передающих антенн $N = 8$, число приемных антенн $M = 8$) при использовании различных критериев выбора антенн. При этом, в системе $P = 4$ передающих радиотракта и $L = 4$ приемных радиотракта.)

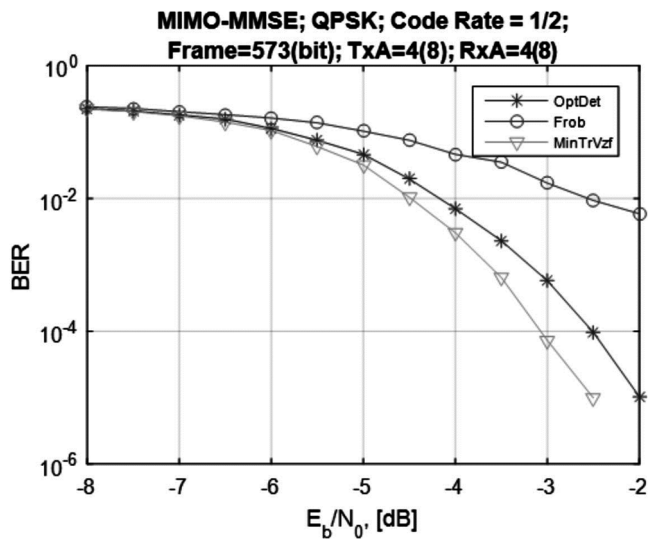


Рис. 2. Помехоустойчивость традиционной системы MIMO (с автовывбором антенн, модуляция QPSK)

На рис. 3 и рис. 4 приведены аналогичные кривые для случая модуляции 16-QAM.

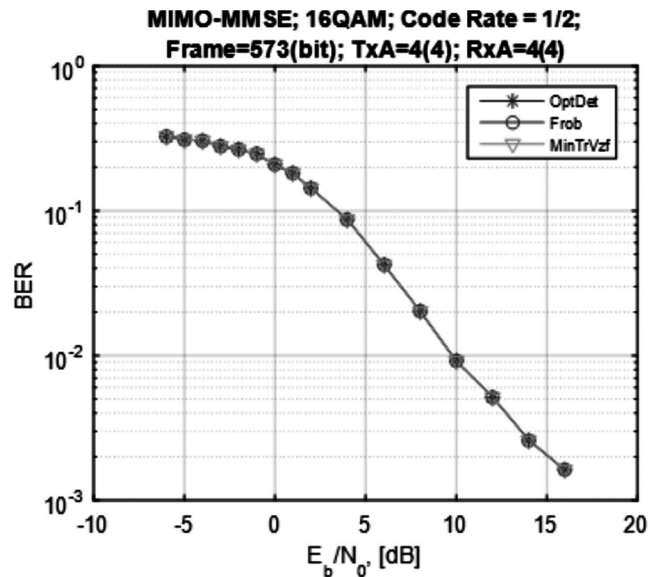


Рис. 3. Помехоустойчивость традиционной системы MIMO (без автовывбора антенн, модуляция 16-QAM)

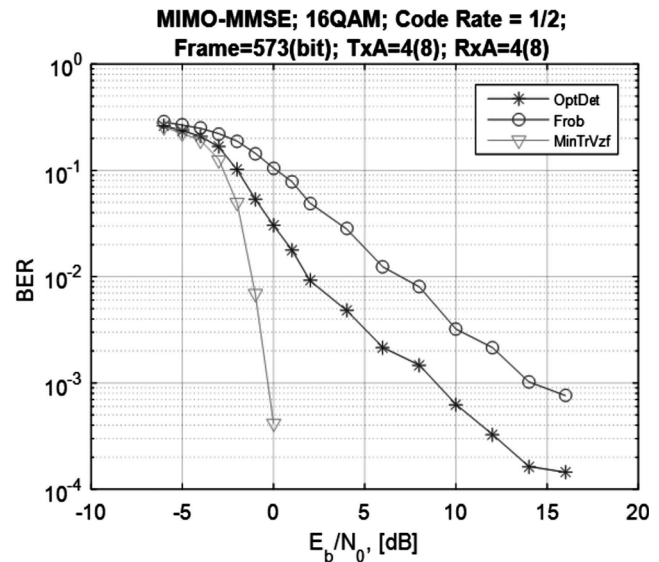


Рис. 4. Помехоустойчивость традиционной системы MIMO (с автовывбором антенн, модуляция 16-QAM)

Из рис. 1 – рис. 4 видно, что автовывбор антенн в условиях релейского канала связи с пространственно некоррелированными замиряниями позволяет получить значительный энергетический выигрыш по сравнению с традиционной системой MIMO с пространственным мультиплексированием без автовывбора антенн.

Наилучшие результаты обеспечивает критерий минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции (6), а наихудшие результаты – критерий максимума отношения сигнал/шум (5). Критерий максимума пропускной способности (4) занимает промежуточное положение. В системе с помехоустойчивым кодированием при уровне BER = 10^{-3} (традиционный уровень вероятности ошибки для систем беспроводной связи) выигрыш от применения автовывбора антенн составляет:

- при использовании критерия максимума отношения сигнал/шум (5) (Frob) – около 4 дБ в случаях QPSK и 16-QAM;

– при использовании критерия максимума пропускной способности (4) (OptDet):

- 6 дБ в случае QPSK;
- 16 дБ в случае 16-QAM;

– при использовании критерия минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции (6) (MinTrVzf):

- 6,5 дБ в случае QPSK;
- 18 дБ в случае 16-QAM.

Следует отметить, что критерий максимума отношения сигнал/шум (5) демонстрирует относительно низкую эффективность, поскольку, в отличие от остальных рассматриваемых критериев (4) и (6), он не учитывает информацию о значении отношения сигнал/шум ρ . Оказывается, что эта информация является существенной при автовыборе антенн.

Помехоустойчивость алгоритмов автовыбора антенн в условиях пространственно-коррелированных замираний

Выше были приведены результаты моделирования систем MIMO в условиях, когда замирания сигналов, пришедших в приемные антенны по разным путям, некоррелированы. На практике такая ситуация встречается достаточно редко. Обычно имеет место канал связи MIMO с пространственно-коррелированными замираниями [8], [9], [10], [11].

В данном разделе используется широко известная модель Кронекера, выражение для матрицы канала MIMO для которой описывается следующим образом:

$$\mathbf{H} = \text{Const} \cdot \mathbf{R}_r^{1/2} \cdot \mathbf{H}_w \cdot \mathbf{R}_t^{1/2}, \quad (7)$$

где \mathbf{H} – матрица канала MIMO с коррелированными элементами; \mathbf{H}_w – матрица канала MIMO с некоррелированными элементами; \mathbf{R}_t – корреляционная матрица на передаче размерности $N \times N$; \mathbf{R}_r – корреляционная матрица на приеме размерности $M \times M$. Const – постоянный нормирующий множитель, определяемый с помощью следующего соотношения:

$$\text{Const} = \frac{\sqrt{M \cdot N}}{\sqrt{\text{tr}(\mathbf{R}_r) \cdot \text{tr}(\mathbf{R}_t)}} \quad (8)$$

Нормирующий множитель (8) необходим для поддержания постоянного отношения сигнал/шум в канале связи MIMO при изменении степени пространственной корреляции замираний.

В модели Кронекера (7) используется операция извлечения квадратного корня из матрицы [13]. По определению, должно выполняться следующие равенства:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_r^{1/2} \cdot \mathbf{R}_r^{1/2} &= \mathbf{R}_r, \\ \mathbf{R}_t^{1/2} \cdot \mathbf{R}_t^{1/2} &= \mathbf{R}_t. \end{aligned} \quad (9)$$

Отметим, что учет пространственной корреляции замираний производится путем подстановки матрицы канала (7) в модель наблюдаемого сигнала (1). Корреляционные матрицы \mathbf{R}_t и \mathbf{R}_r могут быть представлены в следующей форме [1], [12]:

$$\mathbf{R}_t = \begin{bmatrix} 1 & \rho_t & \rho_t^4 & \dots & \rho_t^{(N-1)^2} \\ \rho_t & 1 & \rho_t & \dots & \vdots \\ \rho_t^4 & \rho_t & 1 & \dots & \rho_t^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \rho_t \\ \rho_t^{(N-1)^2} & \dots & \rho_t^4 & \rho_t & 1 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} 1 & \rho_r & \rho_r^4 & \dots & \rho_r^{(N-1)^2} \\ \rho_r & 1 & \rho_r & \dots & \vdots \\ \rho_r^4 & \rho_r & 1 & \dots & \rho_r^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \rho_r \\ \rho_r^{(N-1)^2} & \dots & \rho_r^4 & \rho_r & 1 \end{bmatrix},$$

где ρ_t , ρ_r – коэффициенты корреляции замираний в двух соседних передающих и приемных антеннах, соответственно.

Моделирование алгоритмов автовыбора антенн в условиях наличия пространственной корреляции замираний в канале связи MIMO проводилось при следующих условиях:

- вид замираний – Релеевские, пространственная корреляция которых определяется уравнениями (6) и (10);
- остальные условия моделирования те же, что и в разделе 3;
- $\rho = \rho_t = \rho_r = 0,4$, т.е. предполагается, что корреляция замираний на передающей и приемной сторонах одинакова.

На рис. 5 показаны зависимости BER от E_b/N_0 для случая традиционной системы MIMO (автовыбор антенн отсутствует) при наличии в канале MIMO пространственно-коррелированных замираний.

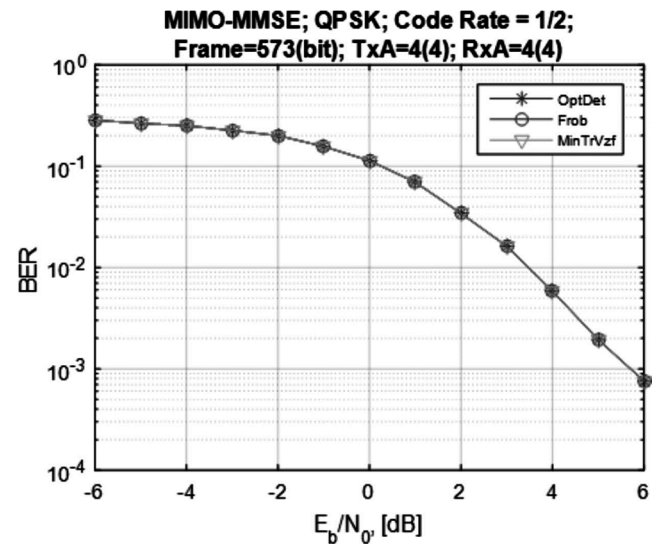


Рис. 5. Помехоустойчивость традиционной системы MIMO (без автовыбора антенн, модуляция QPSK, канал с пространственно-коррелированными замираниями)

На рис. 6 показаны зависимости BER от E_b/N_0 для случая системы MIMO с автовыбором антенн ($N = 8$, $M = 8$) при использовании описанных в разделе 2 критериев выбора антенн.

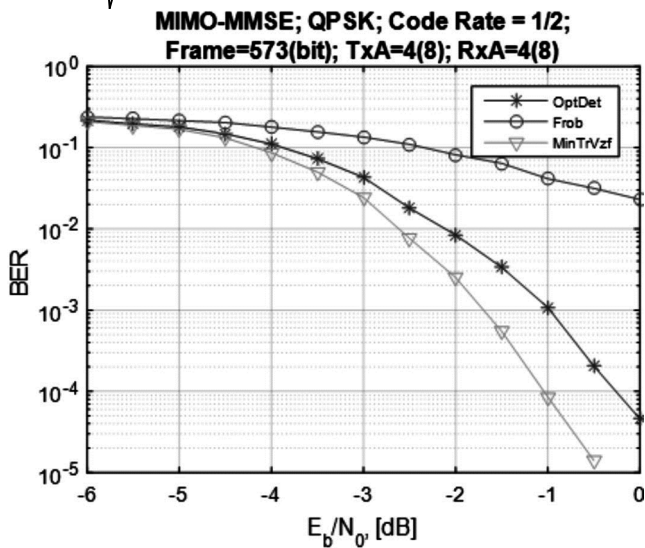


Рис. 6. Помехоустойчивость традиционной системы MIMO (с автовыбором антенн, модуляция QPSK, канал с пространственно-коррелированными замираниями)

На рис. 7 и рис. 8 приведены аналогичные кривые для случая модуляции 16-QAM. Из рис. 5 – рис. 8 видно, что автовыбор антенн в условиях релеевого канала связи, где имеется пространственная корреляция замираний, также позволяет получить существенный энергетический выигрыш по сравнению с традиционной системой MIMO без автовыбора антенн.

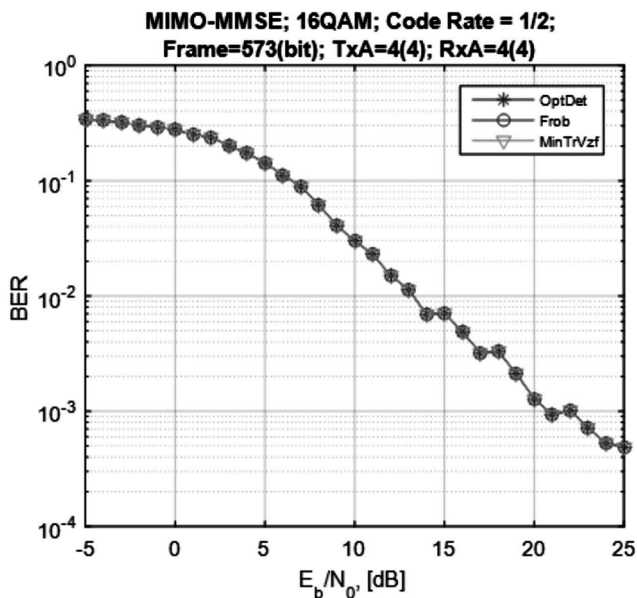


Рис. 7. Помехоустойчивость традиционной системы MIMO (без автовыбора антенн, модуляция 16-QAM, канал с пространственно-коррелированными замираниями)

Так же, как и в случае отсутствия в канале пространственной корреляции замираний, при наличии такой корреляции наилучшие результаты обеспечивает критерий (6), а наихудшие результаты – критерий (5). Критерий (4) занимает промежуточное положение. В системе с помехоустойчивым кодированием при уровне $BER = 10^{-3}$ и при коэффициенте пространственной корреляции замираний $\rho = \rho_t = \rho_r = 0,4$ выигрыш от применения автовыбора антенн составляет:

- при использовании критерия (5) (Frob):

- 2,5 дБ в случае QPSK;
- 0,5 дБ в случае 16-QAM;
- при использовании критерия (4) (OptDet):
- 7 дБ в случае QPSK;
- 16,5 дБ в случае 16-QAM;
- при использовании критерия (6) (MinTrVzf):
- 6,5 дБ в случае QPSK;
- 17,5 дБ в случае 16-QAM.

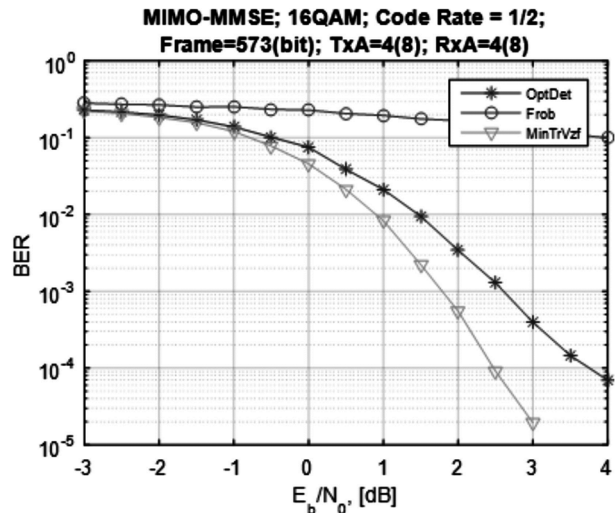


Рис. 8. Помехоустойчивость традиционной системы MIMO (с автовыбором антенн, модуляция 16-QAM, канал с пространственно-коррелированными замираниями)

Следует заметить, что для осуществления переключения антенн в процессе их автовыбора используются антенные переключатели [14], [15], [16]. В таких переключателях имеют место энергетические потери, величина которых составляет 0,5-1 дБ. Таким образом, при наличии двух переключателей (по одному переключателю на передающей и приемной сторонах) общая величина потерь составляет 1-2 дБ. В то же время энергетический выигрыш от применения автовыбора антенн в данных условиях может достигать 18 дБ.

Заключение

Проведенные исследования различных алгоритмов автовыбора антенн в системах MIMO с пространственным мультиплексированием позволяют сделать следующие выводы:

Использование автовыбора антенн на передаче и приеме позволяет получить значительный (до 18 дБ) энергетический выигрыш;

Критерий автовыбора антенн (критерий максимума отношения сигнал/шум (5) позволяет получить относительно небольшой энергетический выигрыш, не превышающий 4 дБ;

Критерий максимума пропускной способности (4) позволяет получить энергетический выигрыш до 16 дБ;

Критерий минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции (6), предложенный в работе [7], позволяет получить энергетический выигрыш до 18 дБ;

При использовании модуляции высокого порядка энергетический выигрыш от применения автовыбора антенн при использовании критерия (6) существенно возрастает.

Наличие пространственной корреляции замираний в канале связи MIMO приводит к потерям в помехоустойчивости, но при этом выигрыш от автовыбора антенн, в основном, сохраняется.

Исходя, из изложенного, можно утверждать, что применение автовыбора антенн на передаче и приеме с использованием критерия минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции (6) является весьма перспективным направлением развития систем связи, использующих технологию MIMO.

Литература

1. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология MIMO: принципы и алгоритмы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 272 с.
2. Sanayei S., Nosratinia A. Antenna Selection in MIMO Systems // IEEE Communication Magazine. – 2004. – № 10. – Р. 68-73.
3. Shital Shegokar Jangid. Antenna Selection with Spatial Multiplexing MIMO Systems. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, February 2015, pp. 97-100.
4. Крейнделин В.Б., Хазов М.Л. Алгоритмы переключения антенн в системах MIMO // Электросвязь. – 2017. – № 10. – С. 59-64.
5. Huang G., Papadias C.B. and Venkatesan S. MIMO Communication for Cellular Networks. USA, Springer Science+Busyness Media LLC, 2012, 314 p.
6. Andreas F. Molisch. Wireless Communications. Second Edition, UK, Wiley, 2011. 827 p.
7. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Хазов М.Л. Критерии автовыбора антенн в системах MIMO // Электросвязь. – 2018. – № 10. – С. 78-81.
8. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Технология радиосвязи на пути к 5G. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 272 с.
9. Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Анализ пропускной способности радиоканала системы MIMO в условиях пространственно коррелированных замираний // Информационные процессы. – 2017. – № 3. – С. 188-198.
10. Oesges C., Clerckx B. MIMO Wireless Communications. Channels, Techniques and Standards for Multi-Antenna, Multi-User and Multi-Cell Systems. – U.K.: Academic Press, 2013. – 733 p.
11. Huang G., Papadias C.B., Venkatesan S. MIMO Communication for Cellular Networks. USA, Springer Science+Busyness Media LLC, 2012. – 314 p.
12. MIMO System Technology for Wireless Communications. / Edited by George Tsoulos. USA, FL, Boca Raton, CRC Press, 2006, 378 p.
13. Тыртышников Е.Е. Матричный анализ и линейная алгебра. – М.: Физматлит, 2007. – 480 с.
14. http://www.datasheetlib.com/datasheet/386306/hws408_hexawave.html
15. <http://datasheet.elcodis.com/pdf2/105/36/1053632/njg1535hd3.pdf>
16. <https://www.infineon.com/dgdl?fileId=db3a30433f1b26e8013f2db58bc03856>

НОВЫЕ КНИГИ

Горгадзе С.Ф., Бокк Г.О.

Планирование и обработка результатов эксперимента в радиотехнике и инфокоммуникационных системах / Учебное пособие - М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2018 г. – 132 с.: ил.

Рассмотрены принципы организации и основные подходы к планированию, проведению и обработке результатов эксперимента в приложениях к радиотехническим и инфокоммуникационным устройствам и системам. Наряду с общими классическими методами статистической дисциплины планирования эксперимента и статистической обработки его результатов, проиллюстрированными расчетными примерами, рассмотрены и вопросы организации компьютерных экспериментов при моделировании радиотехнических устройств и систем. Многофакторные модели на основе статистических уравнений регрессии дополнены важными для радиотехнических приложений однофакторными моделями нелинейных объектов, описываемыми рядами Вольтэрры и Тейлора.

Для студентов, обучающихся по направлениям 11.04.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и 11.04.01 – «Радиотехника» (квалификации «магистр»), может быть полезно специалистам.

