

Алгоритмы автовыбора антенн в системе ММО без перебора комбинаций

М.Г. Бакулин, В.Б. Крейнделин, Д.Ю. Панкратов

Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия
m.g.bakulin@gmail.com, vitkrend@gmail.com, dpankr@mail.ru

Поступила в редколлегию 07.10.2020

Аннотация—В последнее время ведутся активные исследования систем ММО и, в частности, систем ММО с автовыбором антенн. Наиболее эффективные критерии выбора антенн требуют перебора всех возможных сочетаний антенн. Из критерия максимума пропускной способности вытекает алгоритм, использующий норму Фробениуса, который не требует перебора всех возможных сочетаний антенн. Однако он приводит к существенному ухудшению характеристик. В данной работе предлагается алгоритм выбора антенн, использующий критерий минимума следа корреляционной матрицы (минимума среднеквадратической ошибки, MMSE), не требующий перебора всех сочетаний антенн и имеющий небольшие потери по сравнению с полным перебором.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автовыбор антенн, алгоритмы автовыбора антенн, оптимальные алгоритмы автовыбора антенн, системы ММО, ММО, критерий минимума следа корреляционной матрицы, алгоритмы на базе критерия минимума следа ковариационной матрицы.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большое распространение получили системы связи со многими передающими и многими приемными антеннами (Multiple-Input-Multiple-Output, ММО) благодаря их высокой спектральной эффективности и помехоустойчивости [10], [11], [12], [13]. С увеличением числа антенн в системах ММО существенно увеличивается сложность цифровой обработки сигналов в таких системах, поэтому активно проводятся исследования технологии автовыбора антенн для систем ММО, которая позволяет снизить сложность обработки сигналов и снизить стоимость оборудования. При этом важно сохранить основные преимущества систем ММО без ухудшения или с незначительным ухудшением характеристик таких систем. [2], [3]. В работе [14] было показано, что технология автовыбора антенн позволяет повысить помехоустойчивость систем ММО с пространственно-временным кодированием. Основной идеей технологии автовыбора антенн является выбор некоторого подмножества антенн из всего множества доступных антенн, при этом антенны могут выбираться как на приемной, так и на передающей стороне согласно различным критериям выбора [9]. Наиболее распространенными являются критерии максимума отношения сигнал/шум (ОСШ) и максимума пропускной способности, которые требуют полного перебора всех сочетаний антенн [2], [9].

1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ММО БЕЗ И С АВТОВЫБОРОМ АНТЕНН

Исследования систем связи со многими передающими антеннами и многими приемными антеннами (ММО -Multiple-Input-Multiple-Output) ведутся уже около 30 лет и, как показывают результаты испытаний, такие системы наиболее эффективны в радиоканалах с независимыми

релеевскими замираниями [13], [15]. Основными режимами работы систем МИМО являются пространственное мультиплексирование и пространственно-временное кодирование. В режиме пространственного мультиплексирования возможно достижение максимальной спектральной эффективности систем МИМО. Благодаря передаче параллельных независимых потоков информации с помощью различных передающих антенн, возможно их разделение на приемной стороне [15]. В режиме пространственно-временного кодирования возможно достижение максимальной помехоустойчивости систем МИМО, благодаря совместному использованию пространственного разнесения и нескольких временных интервалов для передачи информационных символов [14], [16]. В последнее время для систем радиосвязи 5G ведутся активные исследования применения технологии МИМО с большим числом антенн (Massive МИМО) [16], [17]. На пути практического применения систем Massive МИМО существует ряд проблем, в частности, проблема высокой сложности цифровой обработки сигналов для таких систем. Поэтому актуальной является разработка алгоритмов цифровой обработки сигналов, имеющих приемлемую вычислительную сложность. Технология автовыбора антенн для систем МИМО позволяет сократить сложность таких систем за счет того, что число антенн, используемых для передачи и приема сигналов, выбирается меньшим общего числа антенн [2], [14]. При этом требуется меньше радиочастотных блоков, передаются только наиболее подходящие по некоторому критерию (например, максимум ОСШ) сигналы и сокращается сложность алгоритмов демодуляции на приемной стороне. Структурная схема системы МИМО с автовыбором антенн приведена на Рис. 1. Сначала рассмотрим математическую модель МИМО без автовыбора антенн, а затем с автовыбором антенн. Модель системы МИМО без автовыбора антенн имеет следующий вид [10], [13]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \eta, \quad (1)$$

где $\mathbf{H}$ – матрица канала МИМО размера $M \times N$, состоящая из комплексных коэффициентов передачи h_{ij} , $i = 1, \dots, M$, $j = 1, \dots, N$ между j -й и i -й антеннами. Вектор $\mathbf{s}$ передаваемых сигналов имеет размерность $N \times 1$, вектор принимаемых сигналов $\mathbf{y}$ имеет размерность $M \times 1$. Предполагается, что в радиоканале присутствует аддитивный белый гауссовский шум η .

Теперь рассмотрим систему МИМО с автовыбором антенн. Пусть в рассматриваемой системе присутствует N передающих антенн и M приемных антенн. При этом число радиочастотных цепей (блоков) на передающей стороне составляет $n < N$ и число радиочастотных цепей (блоков) на приемной стороне составляет $m < M$. Передаваемые данные после соответствующей обработки (кодирование и цифровая модуляция) поступают на n радиочастотных блоков, при этом для передачи используется n антенн (вместо N антенн в системе МИМО без автовыбора антенн). Аналогично на приемной стороне используется m антенн (вместо M антенн в системе МИМО без автовыбора антенн) и m радиочастотных блоков, с выхода которых сигналы поступают на блок цифровой обработки сигналов. На приемной стороне в блоке цифровой обработки сигналов (ЦОС) осуществляется демодуляция и декодирование, а также данные объединяются в общий поток и передаются получателю информации. Модель системы МИМО с автовыбором антенн имеет следующий вид:

$$\mathbf{y} = \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{s} + \eta \quad (2)$$

где $\tilde{\mathbf{H}}$ – матрица канала МИМО размерности $m \times n$, в которой присутствуют элементы $\tilde{h}_{ij}$, $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, n$, соответствующие выбранным антеннам.

Для автовыбора требуется информация о коэффициентах передачи h_{ij} между всеми антеннами, т.е. вся матрица $\mathbf{H}$ канала МИМО. Предполагается, что информация о радиоканале оценивается на приемной стороне и передается на передающую сторону по обратному каналу. Полученные сведения о радиоканале используются для выбора передающих и/или приемных антенн.

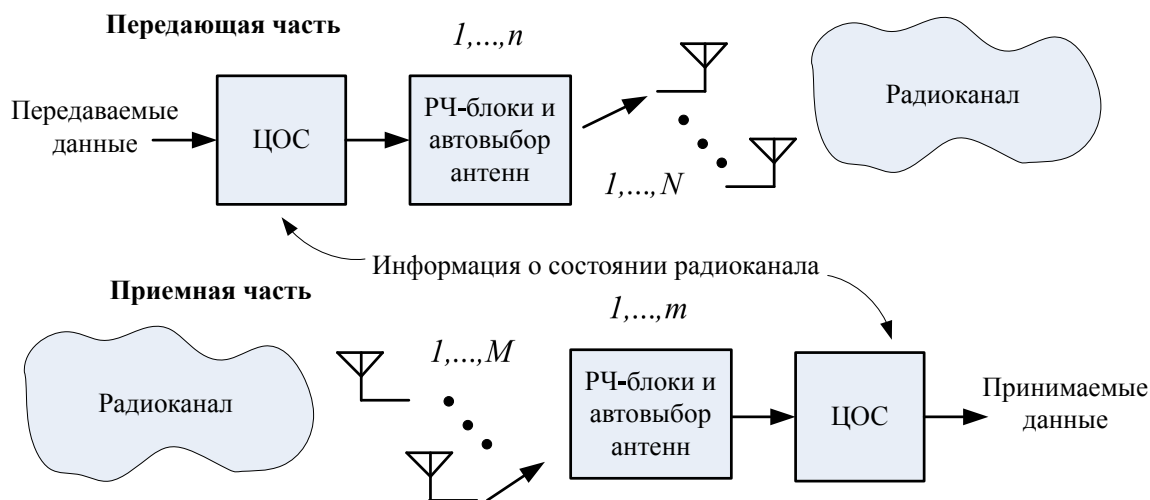


Рис. 1. Структурная схема системы MIMO с автовыбором антенн. Задача автовыбора антенн состоит в выборе из общего множества антенн наиболее подходящего по некоторому критерию подмножества антенн, при этом автовыбор может осуществляться как на передающей стороне, так и на приемной стороне.

2. ОСОБЕННОСТИ АВТОВЫБОРА АНТЕНН НА ПРИЕМНОЙ СТОРОНЕ

Технология MIMO может работать в режиме пространственного разнесения (Spatial Diversity) или в режиме пространственного мультиплексирования (Spatial Multiplexing). Пространственное мультиплексирование направлено на повышение пропускной способности систем MIMO, а пространственное разнесение - на повышение помехоустойчивости. Как давно известно [10], использование нескольких антенн как на передающей стороне (разнесенная передача), так и на приемной стороне (разнесенный прием) обеспечивает несколько пространственных путей для передачи сигналов. При использовании разнесенного приема на вход РЧ-блоков (радиочастотных блоков) поступает несколько копий сигналов, каждой из которых соответствует свой комплексный коэффициент передачи из матрицы $\mathbf{H}$ канала MIMO. Благодаря использованию алгоритмов ЦОС, на приемной стороне обеспечивается выигрыш в помехоустойчивости. Существуют следующие алгоритмы ЦОС для приема сигналов от разных антенн [19]. Например, в самом простом случае сигналы могут складываться с равными весами, для этого не требуется дополнительной информации об ОСШ. При использовании информации об ОСШ для вычисления весовых коэффициентов возможно оптимальное сложение сигналов по критерию максимального общего ОСШ. При использовании технологии автовыбора антенн на приемной стороне [2] используется только m из антенн M и m РЧ-блоков. При этом необходимы сведения об ОСШ для всех M антенн. Однако, если обстановка в канале связи меняется, то необходимо чаще оценивать эту информацию для выбора антенн.

3. МЕТОД ГИБРИДНОЙ ПЕРЕДАЧИ С ВЫБОРОМ АНТЕНН ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ

В методе гибридной передачи с выбором антенн по критерию максимального отношения сигнал/шум (hybrid maximal ratio transmission) выбирается $n < M$ антенн таким образом, чтобы обеспечивалось максимальное отношение сигнал/шум на приемной стороне. Мощность, излучаемая выбранными антеннами на передающей стороне, должна оставаться постоянной. Для этого метода требуются сведения о коэффициентах матрицы канала между всеми передающими и приемными антеннами. Известно [9], [20], что эквивалентный коэффициент передачи по радиоканалу системы с одной передающей антенной и одной приемной антенной (Single-

Input-Single-Output (SISO)) для матрицы определяется следующим соотношением:

$$h_{equiv}^{SISO} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2}. \quad (3)$$

Сравним соотношение (3) с нормой Фробениуса матрицы, которая определяется следующим соотношением [21]:

$$\|\tilde{\mathbf{H}}\|_F^2 = \sum_{i,j} |h_{ij}|^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2 \quad (4)$$

Нетрудно заметить из (3) и (4), что ОСШ для эквивалентного радиоканала SISO пропорционально норме Фробениуса матрицы $\tilde{\mathbf{H}}$, которая получается из матрицы радиоканала ММО $\mathbf{H}$ с полным числом антенн путем удаления строк и столбцов. Таким образом, из общего числа строк и столбцов матрицы $\mathbf{H}$ размерности $M \times N$ для матрицы $\tilde{\mathbf{H}}$ размерности $m \times n$ выбираются только те строки и столбцы, которые вносят максимальный вклад в ОСШ эквивалентного радиоканала SISO. Матрица $\tilde{\mathbf{H}}$ образуется в результате выбора подмножеств из m строк и n столбцов из исходной матрицы $\mathbf{H}$. Рассмотрим пример. При выборе 1 из 2 строк и 1 из 2 столбцов в матрице $\mathbf{H}$ размерности 2×2 необходимо перебрать $2 \cdot 2 = 4$ сочетаний. Рассмотрим теперь матрицу $\mathbf{H}$ размерности 3×3 , которая имеет следующий вид:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} = [\mathbf{h}^1 \ \mathbf{h}^2 \ \mathbf{h}^3] = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h}_2 \\ \mathbf{h}_3 \end{bmatrix}.$$

Матрицу $\mathbf{H}$ можно представить в виде векторов-столбцов $\mathbf{h}^j$ или в виде векторов-строк $\mathbf{h}_i$. Нетрудно заметить, что для выбора 2 из 3 строк и 2 из 3 столбцов из этой матрицы необходимо перебрать $3 \cdot 3 = 9$ сочетаний. Для системы ММО с большим числом антенн число перебираемых сочетаний строк и столбцов для формирования матрицы $\tilde{\mathbf{H}}$ с максимальной нормой Фробениуса оказывается слишком большим, и для перебора требуются большие вычислительные затраты. Было предложено множество квазиоптимальных алгоритмов автовыбора антенн, имеющих меньшую вычислительную сложность, но по эффективности существенно проигрывающих алгоритму автовыбора с полным перебором [2], [3], [4], [5]. Однако, задача разработки алгоритма поиска максимальной нормы $\tilde{\mathbf{H}}$ с приемлемой вычислительной сложностью и имеющего эффективность, как алгоритм перебора всех сочетаний строк и столбцов исходной матрицы $\mathbf{H}$, пока не решена.

4. АВТОВЫБОР АНТЕНН НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ММО

Известно [10], [13] что в канале ММО с релейскими замираниями при отсутствии пространственной корреляции пропускная способность системы ММО растет пропорционально $\min\{M, N\}$. Таким образом, в случае $M = N$ в системе ММО организуется N параллельных пространственных потоков, что позволяет повысить спектральную эффективность системы радиосвязи в N раз. Однако не все пространственные каналы вносят одинаковый вклад в пропускную способность системы ММО [22]. Благодаря отключению наименее эффективных каналов возможно улучшение характеристик систем ММО с помощью технологии автовыбора антенн. Существуют также алгоритмы перераспределения мощности в более эффективные каналы [23].

Использование критерия максимального ОСШ в режиме пространственного разнесения (3) нацелено на повышении максимальной помехоустойчивости системы ММО с автовыбором антенн. В режиме пространственного мультиплексирования технологию автовыбора антенн для повышения спектральной эффективности системы ММО целесообразно использовать критерий максимальной пропускной способности [9].

Выражение для пропускной способности радиоканала системы ММО с автовыбором антенн (без учета пространственно-коррелированных замираний) имеет следующий вид [13], [20]:

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{1} + \frac{\rho}{n} \cdot \tilde{\mathbf{H}}' \cdot \tilde{\mathbf{H}} \right), \quad (5)$$

где ρ – отношение сигнал/шум на входе одной приемной антенны. При этом предполагается, что излучаемая всеми m передающими антеннами мощность одинакова. Пропускная способность, вычисляемая по формуле (5), является нормированной к полосе частот и имеет размерность бит/с/Гц. Задача оптимизации по рассматриваемому критерию ставится следующим образом. Необходимо выбрать строки и столбцы матрицы $\mathbf{H}$ и сформировать матрицу $\tilde{\mathbf{H}}$ таким образом, чтобы максимизировать пропускную способность (5) радиоканала системы ММО. Для формирования матрицы $\tilde{\mathbf{H}}$ необходимо из исходной матрицы $\mathbf{H}$ размерности $M \times N$ удалить $M - m$ строк и $N - n$ столбцов, которые вносят наименьший вклад в пропускную способность. Чтобы решить эту задачу, необходимо перебрать все возможные сочетания из m строк и n столбцов, из которых формируется матрица $\tilde{\mathbf{H}}$, и для каждого варианта вычислить пропускную способность по формуле (5). Нетрудно заметить, что для большого числа антенн это потребует больших вычислительных затрат. Для сокращения вычислительных затрат в литературе [24] предлагается использовать следующее приближение. Пусть ОСШ является невысоким, т.е. $\rho \ll 1$, тогда, используя известное матричное тождество [24] получим:

$$\det (\mathbf{1} + \delta \cdot \mathbf{A}) \approx 1 + \delta \cdot \text{tr} (\mathbf{A}), \quad |\delta| \ll 1$$

где $\mathbf{1}$ – единичная матрица; $\text{tr} (\mathbf{A})$ – след матрицы $\mathbf{A}$. Используем разложение в ряд Тейлора функции логарифма [24], пренебрегая членами высокого порядка. С учетом этих соотношений перепишем выражение (5) в следующем приближенном виде:

$$C \approx \log_2 \det \left(\mathbf{1} + \frac{\rho}{n} \cdot \text{tr} (\tilde{\mathbf{H}}' \cdot \tilde{\mathbf{H}}) \right) \approx \ln 2 \cdot \frac{\rho}{n} \cdot \text{tr} (\tilde{\mathbf{H}}' \cdot \tilde{\mathbf{H}}). \quad (6)$$

Поскольку след матрицы – это сумма ее диагональных элементов, то приближенная пропускная способность (при низких ОСШ) (6) будет пропорциональна квадрату нормы Фробениуса матрицы $\tilde{\mathbf{H}}$, т.е.

$$\approx \ln 2 \cdot \frac{\rho}{n} \cdot \text{tr} (\tilde{\mathbf{H}}' \cdot \tilde{\mathbf{H}}) = \ln 2 \cdot \frac{\rho}{n} \cdot \|\tilde{\mathbf{H}}\|_F^2. \quad (7)$$

Таким образом, при низких ОСШ стратегии выбора антенн по критериям максимального ОСШ (4) и максимальной пропускной способности совпадают (7). В работе [25] был предложен алгоритм последовательного удаления строк матрицы канала $\mathbf{H}$, вносящих наименьший вклад в пропускную способность. В работе [26] был предложен алгоритм, добавляющий строки матрицы канала $\mathbf{H}$, вносящие наибольший вклад в пропускную способность. Также можно отметить работы [27], [28], [29]. Далее предлагается подход, развивающий эти идеи.

5. АВТОВЫБОР АНТЕНН НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ МИНИМУМА СЛЕДА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МАТРИЦЫ

Перед тем как перейти к рассмотрению нового алгоритма автовыбора антенн, рассмотрим еще один критерий оптимизации – минимум следа корреляционной матрицы [9], которую будем

обозначать как $\mathbf{V}_{MMSE}(\mathbf{H}^{(I_m, J_n)})$. Эта матрица определяется следующим соотношением [9]:

$$\mathbf{V}_{MMSE}(\mathbf{H}^{(I_m, J_n)}) \sim \left(\mathbf{H}^{(I_m, J_n)'} \mathbf{H}^{(I_m, J_n)} + \frac{1}{\rho} \mathbf{1} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Обозначения в матрице $\mathbf{H}^{(I_m, J_n)}$ означают, что в исходной матрице канала МІМО $\mathbf{H}$ выбраны строки с номерами $I_m = [i_1 i_2 \dots i_m]$ и столбцы с номерами $J_n = [j_1 j_2 \dots j_n]$. Нетрудно заметить, что в общем случае для формирования матрицы $\mathbf{H}^{(I_m, J_n)}$ из полной матрицы $\mathbf{H}$ канала МІМО требуется перебор всех возможных сочетаний m из M строк и n из N столбцов. Таким образом, это потребует следующее число комбинаций:

$$N_{\text{comb}} = \frac{M!}{m!(M-m)!} \cdot \frac{N!}{n!(N-n)!}. \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует, что для реализации полного перебора в алгоритме автовыбора антенн, использующего критерий минимума следа корреляционной матрицы, требуется многократное вычисление обратной матрицы размерности $n \times n$, что является сложной вычислительной задачей в реальном времени (поскольку матрица канала МІМО $\mathbf{H}$ меняется при изменении ситуации в канале связи).

6. НОВЫЙ АЛГОРИТМ АВТОВЫБОРА АНТЕНН НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ МИНИМУМА СЛЕДА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МАТРИЦЫ

В этом разделе предлагается новый алгоритм выбора антенн, использующий критерий минимума следа корреляционной матрицы, не требующий перебора всех комбинаций строк и столбцов исходной матрицы радиоканала МІМО. Пусть имеется полная матрица $\mathbf{H}$ для канала МІМО размерностью $M \times N$, $n < N$ – число используемых передающих антенн (и РЧ-блоков); $m < M$ – число используемых приемных антенн (и РЧ-блоков). Необходимо выбрать n передающих и m приемных антенн таким образом, чтобы матрица $\mathbf{H}^{(I_m, J_n)}$, образованная из n столбцов и m строк исходной матрицы $\mathbf{H}$, удовлетворяла некоторому критерию. В качестве критерия используем след корреляционной матрицы:

$$\mathbf{H}_{opt}^{(I_m, J_n)} = \underset{I_m, J_n}{\operatorname{argmintr}} \left(\mathbf{V}_{MMSE}(\mathbf{H}^{(I_m, J_n)}) \right) = \underset{I_m, J_n}{\operatorname{argmintr}} \left(\left(\mathbf{H}^{(I_m, J_n)'} \mathbf{H}^{(I_m, J_n)} + \frac{1}{\rho} \cdot \mathbf{1} \right)^{-1} \right), \quad (10)$$

где $\mathbf{V}_{MMSE}(\mathbf{H}^{(I_m, J_n)}) \sim \left(\mathbf{H}^{(I_m, J_n)'} \mathbf{H}^{(I_m, J_n)} + \frac{1}{\rho} \cdot \mathbf{1} \right)^{-1}$ – корреляционная матрица, соответствующая каналу МІМО с выбором строк с номерами $I_m = [i_1 i_2 \dots i_m]$ и столбцов с номерами $J_n = [j_1 j_2 \dots j_n]$ из исходной матрицы $\mathbf{H}$. В общем случае требуется перебор всех возможных сочетаний m из M строк и n из N столбцов, что требует вычисления обратных матриц, количество которых определяется выражением (9). Предлагается следующий алгоритм, в котором не требуется перебора всех сочетаний строк и столбцов матрицы $\mathbf{H}$.

Шаг 1. Вычисляется полная корреляционная матрица:

$$\mathbf{V}_{MMSE}(\mathbf{H}) = \left(\mathbf{H}' \mathbf{H} + \frac{1}{\rho} \cdot \mathbf{1} \right)^{-1} \quad (11)$$

Шаг 2. В матрице (11) находится диагональный элемент с максимальной дисперсией (например, с номером l).

Шаг 3. Затем из матрицы $\mathbf{H}$ удаляется l -й столбец, в результате чего образуется матрица $\mathbf{H}_{-l}$.

Шаг 4. Рассматривается обратный канал системы ММО, т.е. канал передачи от приемной стороны к передающей стороне. Для него матрица канала будет определяться соотношением [10]:

$$\mathbf{H}_{-l} = \mathbf{H}_{-l}^T \quad (12)$$

Шаг 5. Для матрицы (12) канала ММО вычисляется соответствующая ей корреляционная матрица:

$$\mathbf{V}_{MMSE}(\mathbf{H}_{-l}) = \left(\mathbf{H}_{-l}' \mathbf{H}_{-l} + \frac{1}{\rho} \cdot \mathbf{1} \right)^{-1} \quad (13)$$

Шаг 6. Далее находится диагональный элемент матрицы (13) с максимальной дисперсией (например, с номером k).

Шаг 7. Затем из матрицы $\mathbf{H}_{-l}$ удаляется k -я строка, в результате чего образуется матрица $\mathbf{H}_{-k,-l}$.

Шаг 8. Далее шаги 1-7 повторяются до тех пор, пока размерность текущей матрицы канала не достигнет требуемого значения, т.е. размерности $m \times n$.

Рассмотрим частный случай предлагаемого алгоритма автовыбора антенн для $M = N = 3$ и $m = n = 2$, т.е. нужно выбрать 2 антенны из 3 как на передающей, так и на приемной стороне. Сначала вычисляется корреляционная матрица $\mathbf{V}_{MMSE}(\mathbf{H})$ размерности 3×3 с диагональными элементами v_{11}, v_{22}, v_{33} и определяется максимальный из них, например, $\max(v_{11}, v_{22}, v_{33}) = v_{11}$. Тогда из исходной матрицы канала $\mathbf{H}$ удаляется первый столбец, а затем матрица $\mathbf{H}_{-l} = \mathbf{H}_{-1}$ размерности 3×2 транспонируется, т.е.

$$\mathbf{H}_{-l} = \mathbf{H}_{-1} = [\text{del}(\mathbf{h}^1) \mathbf{h}^2 \mathbf{h}^3] = [\mathbf{h}^2 \mathbf{h}^3]$$

$$\mathbf{H}_{-l}^T = \mathbf{H}_{-1}^T = [\mathbf{h}^2 \mathbf{h}^3]^T$$

где $\mathbf{h}^1, \mathbf{h}^2, \mathbf{h}^3$ - столбцы матрицы канала $\mathbf{H}$. Полученная матрица $\mathbf{H}_{-1}^T$ размерности 2×3 имитирует обратную передачу с приемной стороны на передающую сторону. На основе этой матрицы с помощью (13) вычисляется корреляционная матрица $\mathbf{V}_{MMSE}(\mathbf{H}_{-1}^T)$ размерности 3×3 (по числу используемых для обратной передачи антенн) и находится ее максимальный диагональный элемент. Например, пусть это будет $\max(v_{11}, v_{22}, v_{33}) = v_{11}$. Теперь из матрицы $\mathbf{H}_{-1}^T$ удаляется 1-й столбец или, аналогично, из матрицы $\mathbf{H}_{-1}$ удаляется 1-я строка. В результате получается матрица $\mathbf{H}_{-1,-1}$ размера 2×2 . Нетрудно заметить, что после проведенных преобразований матрица канала примет следующий вид:

$$\mathbf{H}_{-1,-1} = \begin{bmatrix} h_{22} & h_{23} \\ h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$$

Таким образом, из исходной матрицы $\mathbf{H}$ были удалены первая строка и первый столбец, и были выбраны 2 передающие антенны и 2 приемные антенны. В предлагаемом алгоритме не нужно перебирать все комбинации строк и столбцов. Например, в алгоритме с полным перебором для выбора двух передающих антенн из трех нужно перебрать три матрицы $\mathbf{H}_{-1}, \mathbf{H}_{-2}, \mathbf{H}_{-3}$, соответственно.

7. АНАЛИЗ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОГО НОВОГО АЛГОРИТМА АВТОВЫБОРА АНТЕНН

Для обращения матрицы наиболее эффективно использовать формулу Фробениуса [21], [25]. Сложность операции вычисления корреляционной матрицы ошибок размерности $M \times M$ будет определяться выражениями [16]:

$$N_{\text{mult}} = 4M^3 - 2M^2$$

$$N_{\text{add}} = 4M^3 - 5M^2 + 3M,$$

где N_{mult} - число умножений; N_{add} - число сложений. Для наглядности рассмотрим случай, когда из M передающих и M приемных антенн нужно выбрать $\frac{M}{2}$ передающих и $\frac{M}{2}$ приемных антенн. В алгоритме с перебором требуется вычислять корреляционные матрицы размерности $\frac{M}{2} \times \frac{M}{2}$. Для этого требуется $N_{\text{mult}} = \frac{1}{2} (M^3 - M^2)$ операций умножения. Число таких вычислений равно числу возможных комбинаций (9). В итоге общее число операций умножения для данного примера будет определяться выражением:

$$N_{\Sigma \text{mult}} = \frac{1}{2} (M^3 - M^2) \left(\frac{M!}{\left(\left(\frac{M}{2}\right)!\right)^2} \right)^2.$$

Рассмотрим теперь сложность предлагаемого алгоритма автовыбора антенн. Первый цикл исключения передающей и приемной антенны требует две операции вычисления корреляционной матрицы размерности $M \times M$. Следующий цикл требует две операции вычисления корреляционной матрицы размерности $(M-1) \times (M-1)$. И так, до тех пор, пока размерность матрицы не уменьшится до $\frac{M}{2} \times \frac{M}{2}$. В итоге общее число операций умножения для реализации этого алгоритма будет равно

$$N_{\Sigma \text{mult, prop}} = 4 \cdot \sum_{i=0}^{\frac{M}{2}-1} \left(2(M-i)^3 - (M-i)^2 \right)$$

На Рис. 2 приведены зависимости числа операций умножения при реализации алгоритма выбора антенн по критерию минимума следа корреляционной матрицы с полным перебором комбинаций (Min TrVmmse) и предлагаемого нового упрощенного алгоритма без перебора (Min TrVmmse simpl.).

8. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для анализа эффективности предлагаемого нового алгоритма автовыбора антенн было проведено его компьютерное моделирование наряду с другими рассмотренными в данной статье алгоритмами автовыбора антенн. Условия моделирования следующие: осуществлялся выбор 4 из 8 передающих антенн и 4 из 8 приемных антенн; скорость помехоустойчивого кодирования составляла 1/2; длина кадра составляла 573 бита; рассматривалась система ММО с алгоритмом демодуляции, оптимальным по критерию минимума среднеквадратической ошибки (Minimum Mean Square estimation – MMSE).

В результате был построен график (см. Рис. 3) зависимости коэффициента битовых ошибок (Bit Error Rate - BER) от отношения сигнал/шум для следующих алгоритмов:

- алгоритм выбора антенн, оптимальный по критерию максимальной пропускной способности ('Max Capacity');

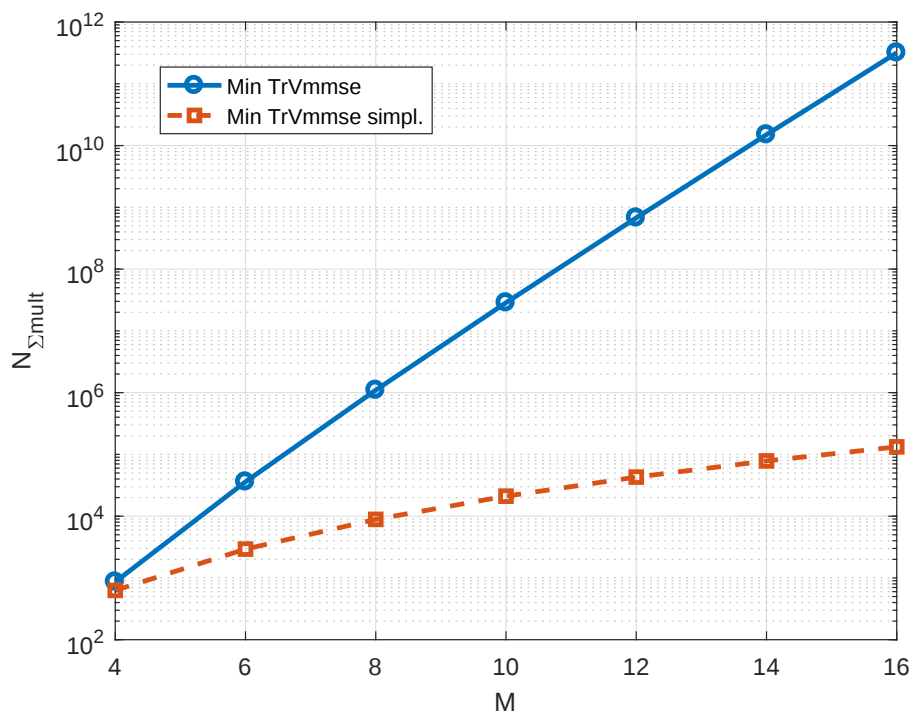


Рис. 2. Зависимость числа операций умножения при реализации алгоритма выбора антенн по критерию минимума следа корреляционной матрицы с полным перебором комбинаций (Min TrVmmse) и предлагаемого нового упрощённого алгоритма без перебора (Min TrVmmse simpl.) от числа антенн.

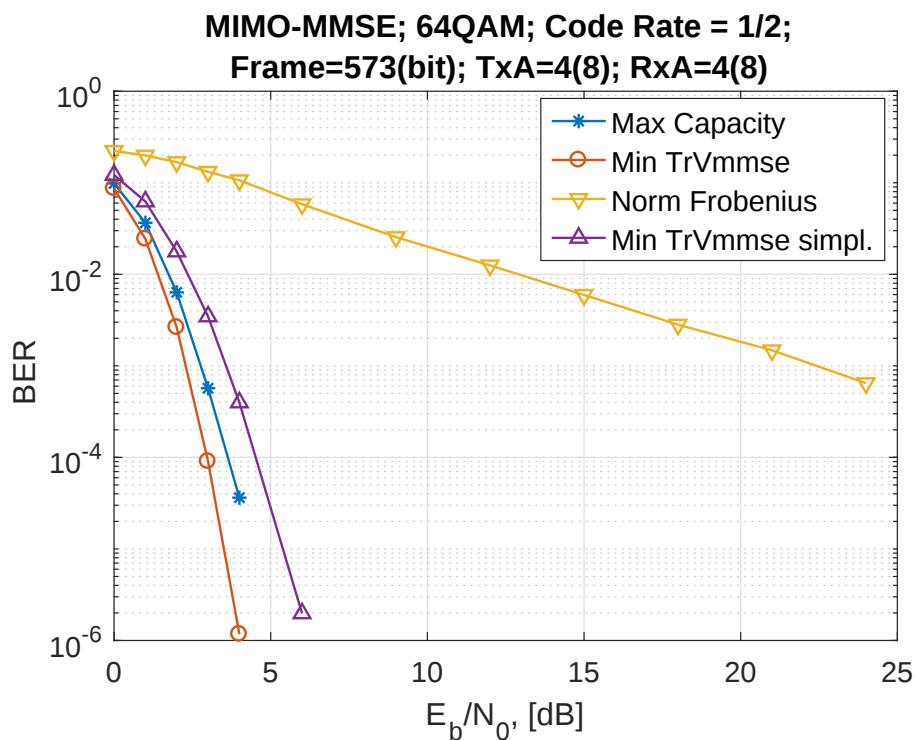


Рис. 3. Зависимость BER от отношения сигнал/шум для различных алгоритмов автовыбора антенн.

- алгоритм выбора антенн, оптимальный по критерию максимума нормы Фробениуса ('Norm Frobenius');
- алгоритм выбора антенн, оптимальный по критерию минимума следа корреляционной матрицы ('Min TrVmmse');
- предлагаемый новый алгоритм выбора антенн ('Min TrVmmse simpl.').

Проведенное компьютерное моделирование указанных алгоритмов автовыбора антенн позволяет сделать следующие выводы:

1. При использовании критерия минимизации нормы Фробениуса необходим перебор всех возможных сочетаний строк и столбцов исходной матрицы канала МИМО, однако это не приводит к хорошим характеристикам по критерию минимума вероятности ошибки, BER порядка 10-3 достигается только при ОСШ порядка 25 дБ.
2. Другие критерии (максимум пропускной способности и минимум следа корреляционной матрицы) позволяют достигнуть уровня BER=10-3 при значениях ОСШ меньше 5 дБ, однако для их реализации требуются существенные вычислительные затраты.
3. Предлагаемый новый алгоритм по эффективности приближается к алгоритмам, оптимальным по критериям максимума пропускной способности и минимума следа корреляционной матрицы при потерях в ОСШ около 1 дБ, при этом он имеет существенно меньшую вычислительную сложность (примерно в 100 раз).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены критерии оптимизации для разработки алгоритмов автовыбора антенн в системах МИМО и предложен новый метод автовыбора антенн с меньшей вычислительной сложностью. Технология автовыбора антенн позволяет снизить аппаратную сложность и стоимость оборудования, а также позволяет получить выигрыш в помехоустойчивости и/или пропускной способности по сравнению с системами без автовыбора антенн. Существует три основных критерия автовыбора антенн: максимизация ОСШ, что эквивалентно максимизации нормы Фробениуса матрицы $\tilde{\mathbf{H}}$ радиоканала МИМО; максимизация пропускной способности и минимизация следа корреляционной матрицы. Эти критерии могут применяться для реализации алгоритмов автовыбора антенн как на приемной стороне, так и на передающей стороне системы МИМО. При этом критерий минимизации нормы Фробениуса неэффективен с точки зрения минимизации битовых ошибок. Однако построенные на основе этих методов алгоритмы требуют существенных вычислительных затрат – требуется перебор всех сочетаний строк и столбцов исходной матрицы $\mathbf{H}$ радиоканала МИМО. Предлагаемый алгоритм автовыбора антенн не требует полного перебора всех комбинаций, а по эффективности приближается к оптимальному по критерию минимума следа корреляционной матрицы алгоритму при потерях в ОСШ около 1 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. W. Heath and D. J. Love, "Multimode antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers," IEEE Trans. Signal Process., vol. 53, pp. 3042-3056, Aug. 2005.
2. A. Molisch and M. Win. "MIMO Systems with Antenna Selection". IEEE Microwave Mag., vol. 5, pp. 46-56, Mar. 2004.
3. S. Sanayei, A. Nosratinia Antenna Selection in MIMO Systems // IEEE Communication Magazine. - 2004. - № 10. - P. 68-73.
4. 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.

5. J. Smith, Peter & W. King, Tim & M. Garth, Lee & Dohler, Mischa. (2006). An Analysis of Low Complexity Algorithms for MIMO Antenna Selection. 3. 1380 - 1385. 10.1109/ICC.2006.254941.
6. Tai, Tzu-Hao & Chung, Wei-Ho & Lee, Ta-Sung. (2015). A Low Complexity Antenna Selection Algorithm for Energy Efficiency in Massive MIMO Systems. 284-289. 10.1109/DSDIS.2015.39.
7. As-Saafani, M.I. & J. Sadi, Sultan & Badran, Ehab & Mohamed, Darwish & Shaaban, Shawki. (2006). Antenna Selection Algorithms in Correlated Fading MIMO Channels. 1 - 8. 10.1109/NRSC.2006.386326.
8. Zhou, Xingyu & Bai, Bo & Chen, Wei. (2014). Iterative Antenna Selection for Multi-Stream MIMO under a Holistic Power Model. Wireless Communications Letters, IEEE. 3. 82-85. 10.1109/WCL.2013.111713.130754.
9. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Хазов М.Л. Критерии автовыбора антенн в системах ММО // Электросвязь. - 2018. - № 10. - с. 78-81.
10. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия - Телеком, 2014., 272 с.
11. Emil Björnson, Jakob Hoydis and Luca Sanguinetti (2017), "Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency Foundations and Trends R in Signal Processing: Vol. 11, No. 3-4, pp 154-655.
12. Kreindelin, V.B., Pankratov, D.Y. Analysis of the Radio Channel Capacity of a MIMO System under the Conditions of Spatially Correlated Fading. J. Commun. Technol. Electron. 64, 863-869 (2019). <https://doi.org/10.1134/S1064226919080242>
13. Jerry R.Hampton. Introduction to MIMO Communications, UK, Cambridge University Press, 2014, 288 p.
14. Крейнделин, В.Б., Панкратов, Д.Ю Совместное использование технологий автовыбора антенн на передаче и пространственно-временного кодирования. // Электросвязь, 2012, № 2, стр. 22-24.
15. Biglieri E., Calderbank R., Constantinides A., Goldsmith A., Paulraj A. and Poor H.V. MIMO Wireless Communication. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2007, 323 p.
16. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Технологии в системах радиосвязи на пути к 5G. М.: Горячая линия - Телеком, 2018, 280 с.
17. K. S. V. Prasad, E. Hossain, and V. K. Bhargava, "Energy efficiency in massive MIMO-based 5G networks: Opportunities and challenges, IEEE Wireless Communications, 2017, vol. 24, № 3, pp. 86-94.
18. Y. Gao, H. Vinck, and T. Kaiser, "Massive MIMO antenna selection: Switching architectures, capacity bounds, and optimal antenna selection algorithms, IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, vol. 66, № 5, pp. 1346-1360.
19. Дж. Боккуци. Обработка сигналов для беспроводной связи. Пер. с англ. Ю.Л.Цвирко. М.: Техносфера. 2012, 672 с.
20. В.Б. Крейнделин, М.Л.Хазов. Алгоритмы переключения антенн в системах ММО // Электросвязь. - 2017. - № 10. - с. 59-64.
21. Тыртышников Е.Е. Матричный анализ и линейная алгебра.- М.: Физматлит, 2007, 480 с.
22. Флакسمан А.Г., Ермолаев В.Т. Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи. Н.Новгород: ННГУ, 2011, 368 с.
23. Elokhin A.V., Sorokin I.S., A.G. Flaksman A.G. Efficiency of threshold method for optimizing bit error Rate and throughput in MIMO system WITH feedback. Zhurnal Radioelektroniki - Journal of Radio Electronics. 2020. № 2. Available at <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/1/text.pdf>.
24. В.Б. Крейнделин, М.Л.Хазов. Алгоритмы переключения антенн в системах ММО // Электросвязь. - 2017. - № 10. - с. 59-64.
25. George A.F. Seber. Matrix Handbook for Statisticians. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008, 593 p.

26. A. Gorokhov, "Antenna Selection Algorithms for MEA Transmission Systems," Proc. IEEE ICASSP, Orlando, FL, May 2002, pp. 2875-2860.
27. A. Gorokhov, "Receive Antenna Selection for MIMO Spatial Multiplexing: Theory and Algorithms," IEEE Trans. Sig. Proc., vol. 51, no. 11, Nov. 2003, pp. 2796-2807.
28. Byung-Jin Lee, Sang-Lim Ju, Nam-il Kim, and Kyung-Seok Kim, "Enhanced Transmit-Antenna Selection Schemes for Multiuser Massive MIMO Systems Wireless Communications and Mobile Computing, 2017, Vol. 2017, pp 1-6.
29. N. Kumar, and D. Kaur, "Cost Reduction and Channel Capacity Enhancement of MIMO System Using Antenna Selection Techniques, "International Journal of Electronics and Telecommunications, 2019, vol. 65, № 2, pp. 189-194.
30. Deepika Patil, Malle Gopal. Complexity reduced antenna selection technique for MIMO communication system. International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2018, Vol. 118 № 14, pp. 323-326.

Antenna Selection Algorithms in MIMO System without Search

M.G. Bakulin, V.B. Kreyndelin, D.Yu. Pankratov

Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Recently, there has been active research on MIMO systems and, in particular, MIMO systems with antenna selection. The most effective antenna selection criteria require exhaustive search of all possible antenna combinations. The maximum throughput capacity implies an algorithm using the Frobenius norm, which does not require search of all possible combinations of antennas. However, it leads to a significant performance degradation. In this paper, we propose an antenna selection algorithm using the minimum trace of the covariance matrix (minimum mean square error, MMSE), which does not require exhaustive search of all antenna combinations and has small performance loss compared to exhaustive search.

KEYWORDS: antenna selection, antenna selection algorithms, antenna selection technique, optimal antenna selection algorithms, MIMO systems, MIMO, minimum trace of covariance matrix, minimum trace of covariance matrix algorithms.