

Современные технологии в системе ММО

В. П. Петров, И. Ю. Якушев

В статье рассматриваются модели ММО с различными вариантами технологий для оптимизации характеристик системы в условиях неселективного канала Релея. Основное внимание уделено сравнительно новым антенным технологиям, которые рекомендуются для сетей пятого поколения – серии технологий пространственной модуляции и технологии антенной селекции. Приведены расчетные формулы производительности и емкости канала и графики на их основе для сравнения характеристик.

Ключевые слова: 5G, BER, ММО, канал Релея, емкость канала, антенные технологии.

1. Введение

Эволюция систем мобильной связи в последние 20 лет была направлена на увеличение производительности и уменьшение вероятности ошибки в городских каналах «передатчик – приемник». Основная сложность в достижении положительных результатов состояла в неопределенности характеристик канала. Функции плотности вероятности Релея, Райса и их обобщений Накагами не снимали неопределенности в моментах распределений, создавая проблему «связь над обобщенными fading-каналами (с замираниями)» [1]. Методология решения комплекса задач, казалось бы, лежит на поверхности. Это представление канала в виде четырехполюсника и известные методы решения с заданными требованиями к каналу. «Заданные требования» могут быть определены либо теоретической оценкой, либо измерениями в процессе организации связи. И то, и другое – с неточностями, которые проявляются в ошибках передачи.

Известно правило в теории передачи сигналов: чем больше сигнальной информации на входе/выходе 4-х полюсника, тем больше информации можно получить о его параметрах. Это правило реализуется в разнесении, в первую очередь в пространственном разнесении антенн на приемнике и на передатчике. Разнесение только на приемнике (система SIMO – *Simple-input-Multiple-output*) позволяет создать множество различных копий на элементах приемной антенной решетки и определить переданный сигнал комбинированием по многим, не совпадающим между собой, разнесенным искаженным сигналам [1, 5]. В системе MISO (*Multiple-input-Simple-output*) с разнесением антенн на передатчике имеются разнообразные возможности, связанные с формированием сигналов и их распределением по элементам антенной решетки. Применительно к системе ММО (*Multiple-input-Multiple-output*) эти возможности реализуются совместно с приемником в различных вариантах, создавая комплекс антенных технологий.

В статье, не претендуя на полноту анализа, рассматриваются перспективные технологии радиосвязи, в основу которых положена система ММО.

2. Радиоканалы и их роль в антенных технологиях

Информация о характеристиках радиоканала между передатчиком и приемником является важным фактором в эффективности системы ММО. Многолучевые каналы, характерные в городских условиях распространения радиоволн, неизбежно порождают задержку сигналов на элементах приемной антенной решетки, что, в свою очередь, потенциально порождает межсимвольную интерференцию (*ISI – intersymbol interference*).

Выбор способа обработки сигналов в приемнике, исключающего появление *ISI*, зависит от свойств рассеивающей среды распространения сигналов. При оценке влияния канала на искажение сигнала особое значение имеет сопоставление частотно-временных характеристик сигнала с характеристиками задержки на приеме. Действительно, лучи могут формироваться близко расположенными препятствиями, при которых разность хода, а значит, и задержка малы, и другой вариант – отражение от далеко расположенных препятствий с большими задержками на приеме. В канале с замираниями взаимосвязь между максимальной задержкой T_m и временем передачи символа T_s приводят к различным классификационным признакам канала в частотной области:

1) *частотно-независимый (плоский) канал*, когда время задержки мало ($T_m < T_s$), тогда полоса когерентности канала B_m больше полосы частот сигнала B_s ; и

2) *частотно-селективный канал*, когда $T_m > T_s$, а, следовательно, полоса частот сигнала B_s больше полосы когерентности канала B_m .

Полоса когерентности канала B_m – это статистическая мера диапазона частот, в рамках которого канал пропускает все спектральные компоненты сигнала с приблизительно равным коэффициентом ослабления и линейным изменением фазы. В данном случае (плоский канал) не порождает межсимвольную интерференцию *ISI*, так как расширение сигнала во времени не приводит к наложению соседних символов. В частотно-селективном канале многолучевой компонент символа выходит за пределы длительности передачи символа и порождает межсимвольную интерференцию *ISI*.

Сети и каналы с плотной городской застройкой, включая каналы внутри помещений, относятся к плоским каналам при передаче сигналов с узкополосной модуляцией, к которым относятся М-арные сигналы. Однако эти же каналы при передаче широкополосных сигналов OFDM, WCDMA относятся к частотно-селективным.

При анализе в приемнике плоских каналов ММО наибольшее применение получили следующие три метода:

- Комбинирование с автовыбором (*Selection Combining – SC*);
- Комбинирование с равным усилением (*Equal Gain Combining – EGC*);
- Комбинирование с максимальным отношением (*Maximal Ratio Combining – MRC*).

Первый из этих методов (*SC*) оценивает отношение сигнал/шум со всех антенных элементов и выбирает наибольшее значение, которое принимается за решение. Метод реализуется относительно просто, но он не является оптимальным, поскольку в нем не используются все полученные сигналы.

Метод *EGC* предполагает равными модули коэффициентов передачи лучей между передатчиком и приемником. Поэтому весовые коэффициенты элементарных сигналов равны единице. Метод также прост в реализации, но условие является необоснованным.

В методе *MRC* элементарные сигналы взвешиваются согласно значению отношения сигнал/шум (ОСШ) на каждом антенном элементе и когерентно суммируются. Информация с антенных элементов в этом случае используется наиболее полно и метод считается наиболее достоверным.

В системе ММО с разнесением антенн на передатчике имеются разнообразные возможности, связанные с формированием сигналов и их распределением по элементам антенной решетки. Применительно к системе ММО эти возможности реализуются совместно с приемником в различных вариантах, создавая комплекс антенных технологий. При этом важную роль

играет наличие информации на передатчике о характеристиках канала. Возможны два варианта: информация на передатчике отсутствует – *открытый канал*, и информация на передатчике доступна – *закрытый канал*. Канал называется закрытым, поскольку для получения информации должен присутствовать канал обратной связи. Этот канал не требует высокой скорости, так как требуемое количество информации о канале значительно уступает сигнальному объему. В обоих случаях характеристики канала известны приемнику путем анализа тестового сигнала передатчика.

Заметим также, что следует различать системы MIMO: система «точка-точка», или однопользовательская система (*Single User MIMO – SU-MIMO*), и система «точка-многоточка», или многопользовательская система (*Multi User MIMO – MU-MIMO*). Названия систем отражают их назначение. Первая – канальная система, вторая – сетевая. В последнее время в связи с предстоящим внедрением 5G появился термин «*Massive MIMO*», который относится к сетевому виду, но с очень большим числом антенных элементов в решетке, создающим особенности анализа.

Ниже будут рассмотрены канальные системы MIMO применительно к частотно-независимым каналам. Их математические модели и анализ являются базовыми для применения в других системах. Задачей анализа является поиск оптимальных условий реализации MIMO, обеспечивающих наибольшую емкость системы и требуемый уровень помехоустойчивости.

3. Обзор антенных технологий системы MIMO

Действующие антенные технологии канальных систем MIMO разнообразием не отличаются и во всех случаях канальная модель в условиях частотно-независимого многолучевого канала в матричной форме описывается уравнением:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

где $\mathbf{y}$ есть матрица-столбец сигналов приёмника, описывающая ансамбль сигналов на элементах приёмной решётки;

$\mathbf{x}$ – матрица-столбец сигналов передатчика, описывающая ансамбль сигналов, излучённых каждым из элементов передающей решётки;

$\mathbf{n}$ – матрица-столбец аддитивных шумов приёмника и помех, создаваемых рассеивающей средой в пространстве между передатчиком и приёмником;

$\mathbf{H}$ – прямоугольная комплексная матрица канала размерности $M \times N$. Компонент h_{ij} этой матрицы есть комплексный коэффициент передачи канала между j -ой передающей антенной и i -ой приёмной антенной. При этом M – количество антенн в приёмной решетке, N – количество антенн в передающей решетке.

В условиях замираний элементы матрицы канала являются случайными величинами, равными относительно главной диагонали ($h_{ij} = h_{ji}$). Как следует из (1), оценка принятого сигнала $\mathbf{y}$ более достоверна, если известна канальная матрица $\mathbf{H}$.

На рис. 1а представлена схема лучей, связывающая передающую и приёмную антенные решетки.

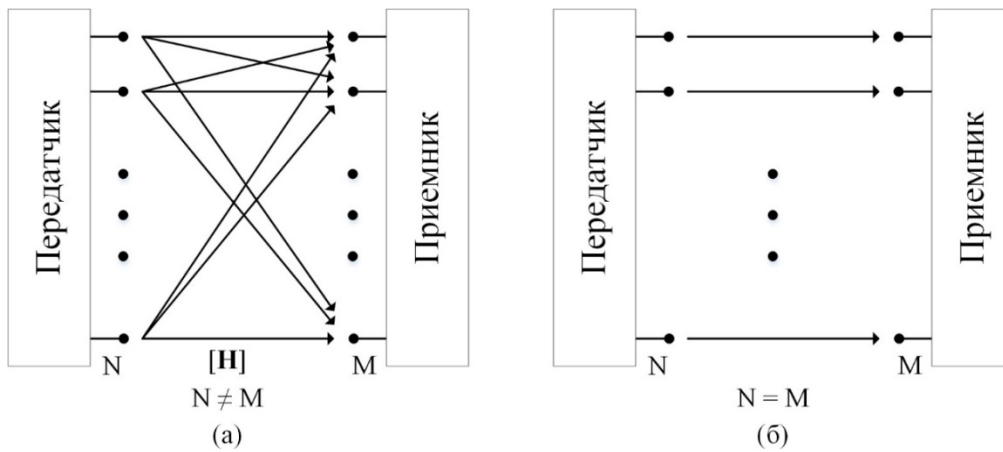


Рис. 1. Система ММО

Преобразование сложной системы потоков в виртуальную систему параллельных потоков от передатчика к приемнику (рис. 1б) осуществляется известным из теории матриц [2, 8] *сингулярным* разложением матрицы $\mathbf{H}$ в виде:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H. \quad (2)$$

В этом уравнении $\mathbf{U}$ и $\mathbf{V}$ – унитарные матрицы с размерами $M \times M$ и $N \times N$ соответственно, $\mathbf{U}^H\mathbf{U} = \mathbf{I}_M$ и $\mathbf{V}^H\mathbf{V} = \mathbf{I}_N$, и $\mathbf{\Sigma}$ – есть диагональная матрица сингулярных значений d_j матрицы $\mathbf{H}$ размером $M \times N$. Известно, что сингулярные значения d_j и собственные значения λ_j связаны соотношением:

$$d_j = \sqrt{\lambda_j}.$$

Количество антенных элементов на передатчике и приемнике, как правило, различно ($M \neq N$). Пример – базовая и мобильная станции. Излучение N антенн распределяется на M приемных антенн. Чтобы представить реальный канал в виде виртуальных параллельных каналов SISO, необходимо допустить равенство антенн передатчика и приемника. Этим равенством является минимальное число M или N , которое в математических моделях является рангом канальной матрицы. В результате преобразований показано [2], что каждый элемент вектора $\mathbf{y}$ может быть представлен следующим образом:

$$y_i = \sqrt{\lambda} \cdot x_i + [\mathbf{U}^H \mathbf{n}]_i. \quad (3)$$

Это уравнение характерно тем, что имеет только соответствующие i -ые лучи от передатчика к приемнику. Отсутствуют канальные лучи h_{ij} . То есть ММО каналы преобразованы в виртуальные параллельные SISO каналы, как отражено на рис. 1б.

Когда информация о канале отсутствует на передатчике, мощность передатчика обычно равномерно распределяется по излучающим элементам антенной решетки. Однако, когда информация известна передатчику, мощность передатчика может быть оптимально распределена по излучающим некоррелированным элементам с целью максимального увеличения спектральной эффективности. Этот способ называется *алгоритмом «заполнения водой»* (WFA – *water-filling algorithm*) [1, 2]. Алгоритм позволяет сконцентрировать излучаемую мощность только в «хороших» пространственных каналах и не тратить энергетические ресурсы передатчика на попытки передать информацию через «плохие» пространственные каналы. «Хорошие» каналы – это каналы, имеющие высокое ОСШ, «плохие» – наоборот. Возможность оценки качества каналов лежит в основе новых технологий.

В результате применения этого алгоритма оптимальная спектральная эффективность определяется формулой [2]:

$$\eta = \sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{P_i}{\sigma^2} \lambda_i \right) = \sum_{i=1}^N \log_2 \left(\left(\bar{\gamma} + \sum_{l=1}^N \frac{1}{\lambda_l} \right) \frac{\lambda_i}{N} \right). \quad (4)$$

На рис. 2 и 3 видно, что емкость системы MIMO повышается при использовании алгоритма WFA. Средняя емкость системы MIMO – это емкость канала (иногда называют эргодической емкостью), гарантированная емкость задается гарантированной вероятностью ошибки P_{out} . В случае, когда алгоритм WFA не используется, мощность излучается одинаково через все пространственные каналы. Построение графиков производится в MATLAB на основе написанных авторами М-функций.

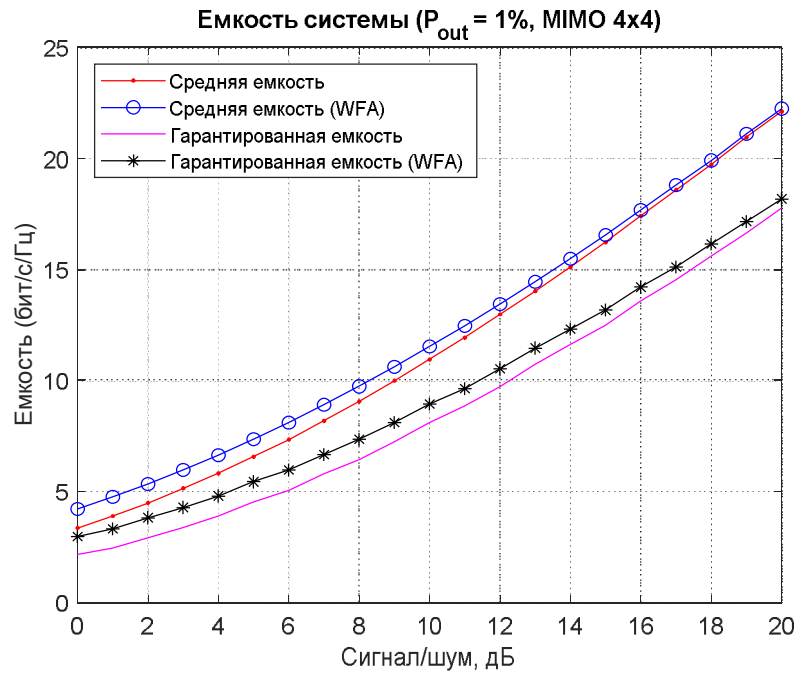


Рис. 2. Емкость системы MIMO с алгоритмом WFA

Рис. 3 отражает преимущество алгоритма WFA для гарантированной емкости системы MIMO 4x4 в зависимости от гарантированной вероятности ошибки при неизменном ОСШ.

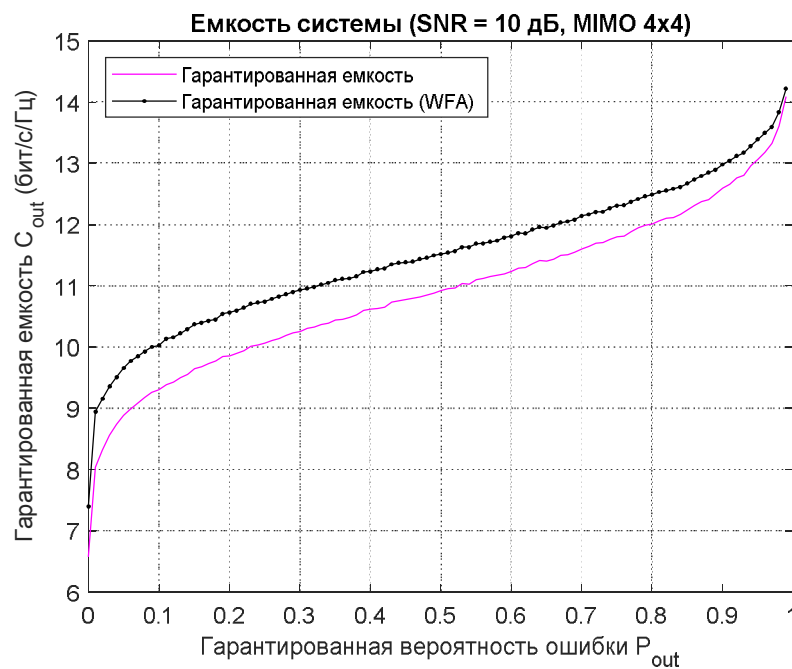


Рис. 3. Гарантированная емкость системы MIMO от P_{out}

Разложение на параллельные виртуальные потоки – это одна из стратегий увеличения емкости системы ММО. Антенные технологии в ММО-системах можно разделить на два вида (рис. 4): традиционные методы, включающие *пространственное мультиплексирование* (рис. 4а) и *пространственно-временное кодирование* (рис. 4б), и новые методы, включающие *пространственную модуляцию* (рис. 4в) и *селекцию передающих антенн* (рис. 4г). Рисунок дает упрощенное представление технологий с использованием двух антенн и двух сигнальных символов.

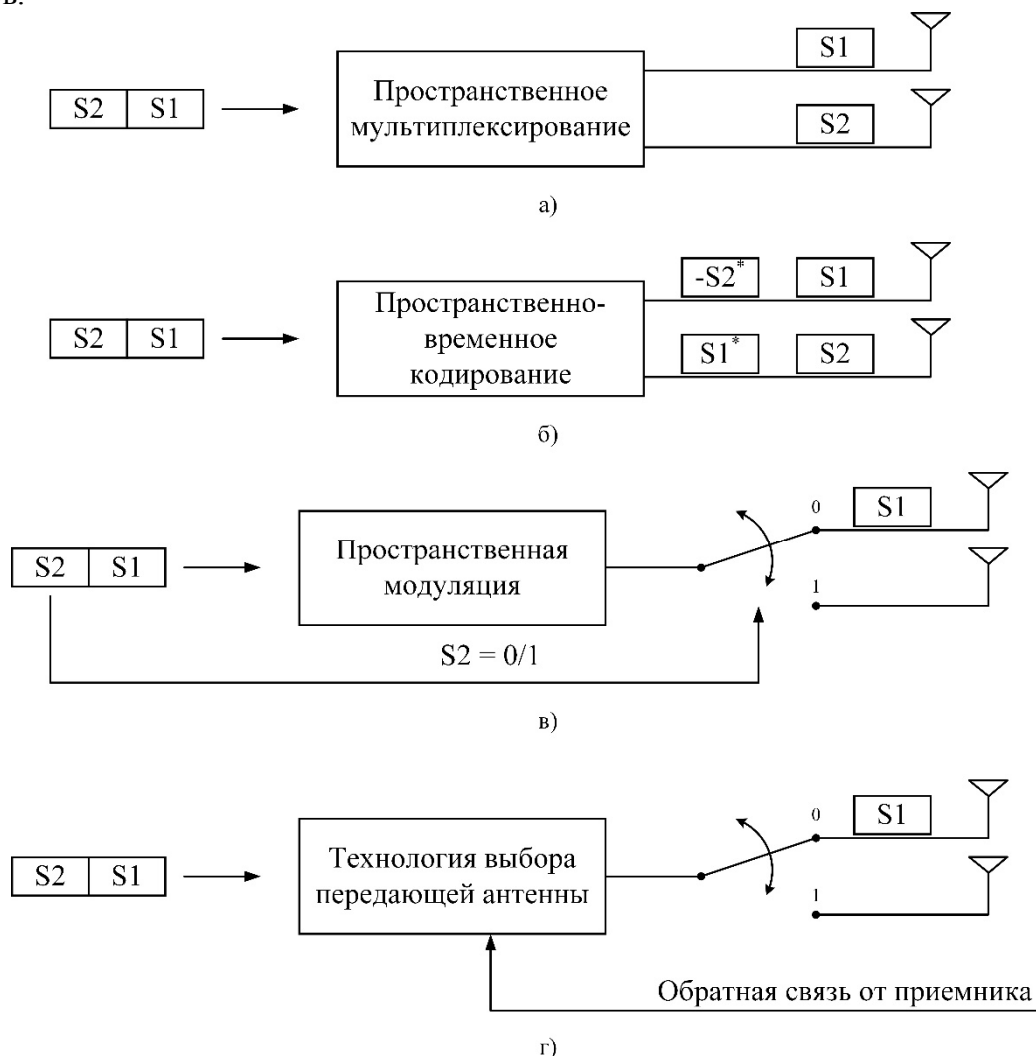


Рис. 4. Методы антенных технологий

При *пространственном мультиплексировании* (*Spatial Multiplexing – SMX*) два символа одновременно излучаются в одном временном слоте. В общем случае поток входящих данных преобразуется из последовательного в параллельный для передачи. Параллельные потоки информации, полученные после этого преобразования, передаются одновременно с нескольких антенн, доступных на передатчике, что обеспечивает высокую спектральную эффективность системы, поскольку скорость передачи данных становится пропорциональной числу передающих антенн [2, 5]. На этом принципе построена схема *BLAST* (*Bell Laboratory Space Time*).

В случае *пространственно-временного кодирования* (*Space Time Coding – STC*), например, схема Аламоути, два ортогональных символа одновременно излучаются в два временных слота. Эта схема хорошо известна и нашла применение в различных системах мобильной связи по причине простой реализации. Недостаток схемы состоит в том, что она реализуется только при двух передающих антеннах и, хотя может использовать несколько приемных антенн, тем не менее, спектральная эффективность схемы недостаточно велика.

Наибольший интерес представляют новые, наименее изученные, направления при исследовании производительности и помехоустойчивости сетей ММО в городских условиях. Это

пространственная модуляция сигналов (Spatial Modulation – SM) и технология выбора передающей антенны в последовательности излучателей сигналов (Transmit Antenna Selection – TAS).

Новые технологии требуют более детальных пояснений. Они родились и были частично исследованы в рамках четвертого поколения [1–5]. Особый интерес проявился к ним в связи с разработкой технологий пятого поколения. Интерес обусловлен не только потенциальным увеличением емкости канала, но и существенным увеличением энергетической эффективности технологий [6].

4. Характеристики технологий пространственной модуляции

Применительно к двум антеннам (рис. 4в) *пространственная модуляция* работает просто: бит 1 – излучает активная антенна, бит 0 – другая антенна не излучает. При передаче последовательного потока из единиц и нулей антенны переключаются, как клавиши на пианино. Предположим теперь, что передающих антенн множество и каждая антенна передает определенный поток битов – набор звуков, присущих данной клавише (антенне). Прием при таком режиме передачи заключается только в извлечении из банка данных передатчика, известного приемнику, последовательных индексов активных антенн. Обратим внимание, что в этом режиме сигнальные биты не передаются физически. При двух антеннах выигрыш мал, не более 3 дБ, но чем больше число передающих антенн, тем разнообразнее варианты и тем больше выигрыш в производительности и в помехоустойчивости при малых затратах энергии, т.е. при высокой энергетической эффективности.

Расширенная блок-схема формирования сигнала в передатчике пространственной модуляции представлена на рис. 5, где блок S/P – преобразование последовательности бит данных в параллельный поток, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, RF Switch – блок выбора активной антенны.

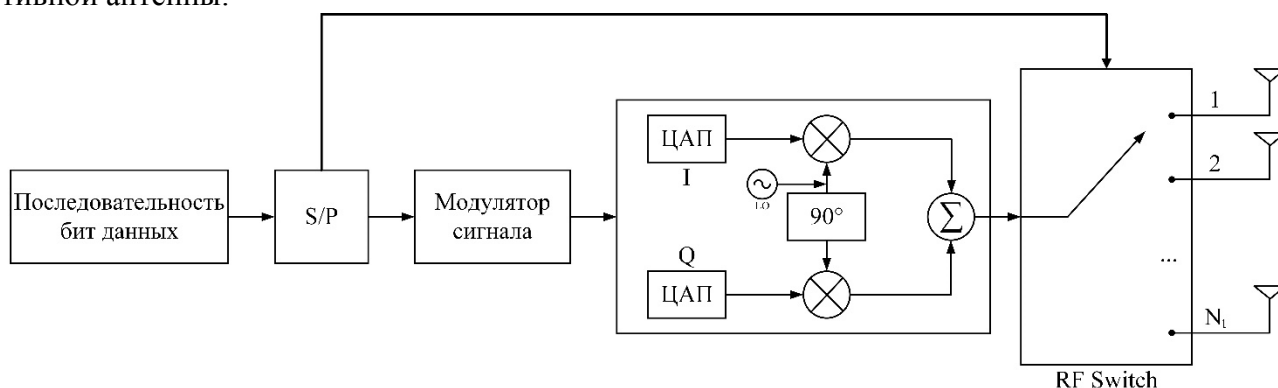


Рис. 5. Блок-схема пространственной модуляции

Предположим, что из N_t передающих антенн в решетке n_u различных антенн являются активными, причем каждая активная антенна имеет свой кодовый набор нулей и единиц. Число комбинаций из N_t по n_u определяется соотношением:

$$C_{N_t}^{n_u} = \frac{N_t!}{n_u!(N_t - n_u)!}. \quad (5)$$

Так, например, $C_4^2 = 6$; $C_6^3 = 20$; $C_8^4 = 70$. Число комбинаций стремительно растет с ростом числа передающих антенн, часть из которых является активными. Этот фактор, как следует из теории пространственной модуляции [7, 8], приводит к выигрышу основных характеристик системы ММО, в том числе *энергетической эффективности* системы. Этот важный параметр имеет тенденцию уменьшаться с ростом *спектральной эффективности* при традиционных

технологиях ММО, но не в данной схеме. Пространственная модуляция особенно эффективна в миллиметровом диапазоне, как планируют в 5G, при антеннах из многих десятков излучателей, поддерживая 4 – 5 активных.

Почему эта технология называется *пространственной модуляцией SM*? Это название она получила, дополняя плоскую звездную диаграмму комплексного сигнала пространственной координатой активных излучателей (индексы антенн), что создает трехмерную пространственную диаграмму [3, 4, 5]. В SM все биты информации не передаются физически. Часть битовой последовательности информации отображается для передачи индексов антенны (*пространственное созвездие*), и антенна, соответствующая отображенному индексу, используется для передачи информационных битов, отображенных на созвездие сигнала. Модель SM ММО рассматривает систему $N_t \times N_r$ ММО, имеющую N_t антенн на стороне передатчика и N_r антенн на стороне приемника. На приемной стороне проводится оптимальная комбинаторная обработка сигналов. Для M-арной схемы модуляции каждый блок из $\log_2(N_t) + \log_2(M)$ битов информации сопоставляется в SM для созвездия сигнала и пространственных созвездий. Биты $\log_2(N_t)$ каждого блока отображаются на точки в пространственных созвездиях, которые выбирают антенну, а биты $\log_2(M)$ отображаются в созвездии сигнала и модулируются модулятором символов с использованием подходящей схемы цифровой модуляции. Затем точка созвездия цифрового модулированного сигнала передается от антенны, на которую сопоставляется точка пространственного созвездия.

Таким образом, используя SM, мы эффективно получаем спектральный коэффициент полезного действия $\log_2(N_t)$ бит/с/Гц без каких-либо дополнительных затрат полосы пропускания или мощности.

Метод не требует знания характеристик канала, то есть нет необходимости в обратной связи с приемником, что является положительным фактором при «on-line» связи.

В сущности, пространственная модуляция SM – это комплекс антенных технологий под общим названием SMTs (*Space Modulation Techniques – технологии пространственной модуляции*), объединенных общим правилом: технологии используют антенные индексы, при которых сигнальная информация не передается физически, а извлекается из банка данных. В крайнем случае, который рассмотрен выше, передача осуществляется только в режиме переключения индексов антенн (*SSK – Space Shift Keying*). При этом можно переключать последовательно либо по одной антенне (*SSK*), либо по две и более – обобщенный режим, или *GSSK*. Очевидно, что второй вариант более производителен. Оба варианта удобно использовать при передаче бинарных сигналов.

SSK – простейшая форма семейства SMTs. В *SSK*-системе данные передаются только через пространственный символ, а переданный сигнал есть немодулированный радиочастотный сигнал, отображающий пространственный индекс активной антенны. Антенны питаются обычно малой выходной мощностью и увеличивают мощность только при передаче сигнала с антенны.

На рис. 6 приведено сравнение большинства типов *SSK*-модуляции для системы ММО 4x4. По рисунку видно, что наименьшей вероятностью ошибки обладает Differential *SSK* (*DSSK*) модуляция. При неизменной вероятности ошибки *DSSK* имеет выигрыш ОСШ в 3 дБ относительно *SSK*-модуляции, *SSK* имеет выигрыш ОСШ в 2 дБ относительно *QSSK* (*Quadrature SM*) модуляции, *QSSK* имеет выигрыш ОСШ в 1 дБ относительно *GSSK* (*Generalized SM*) модуляции, *GSSK* имеет выигрыш ОСШ в 2 дБ относительно *GQSSK*-модуляции [4, 7].

Имитационное моделирование исследуемых систем производится в MATLAB на основе написанных авторами М-функций, по которым в дальнейшем строятся все нижеприведенные графики.

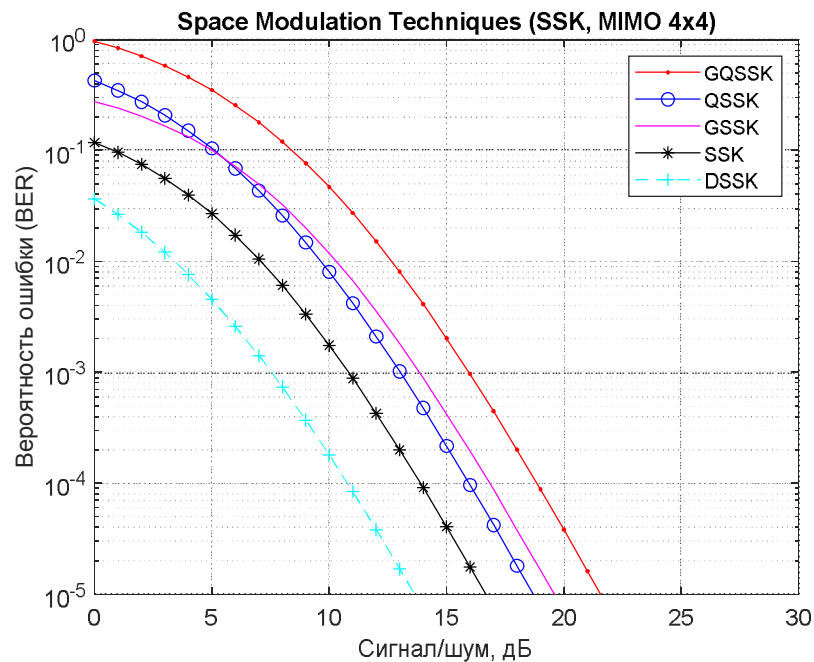


Рис. 6. Средняя вероятность ошибки для различных типов SSK-модуляции

В общем случае технологий SM совместно используются режимы обычной передачи сигнальных битов и антенных индексов. Здесь также имеются варианты, связанные с упорядоченным распределением пассивных и активных антенн [3, 4], детальное рассмотрение которых выходит за рамки статьи. Ниже для примера приводится таблица распределения символьных и пространственных битов при передаче технологией SM-сигналов модуляцией 4-QAM антенной решеткой, состоящей из четырех излучающих элементов [5].

Таблица 1. Распределение символьных и пространственных битов для $N_t = 4$ и 4-QAM-модуляции

Информационные биты	Символьные биты	Символы	Пространственные биты	Антенные индексы
0000	00	$+1+j$	00	1
0001	01	$-1+j$	00	1
0010	10	$-1-j$	00	1
0011	11	$+1-j$	00	1
0100	00	$+1+j$	01	2
0101	01	$-1+j$	01	2
0110	10	$-1-j$	01	2
0111	11	$+1-j$	01	2
1000	00	$+1+j$	10	3
1001	01	$-1+j$	10	3
1010	10	$-1-j$	10	3
1011	11	$+1-j$	10	3
1100	00	$+1+j$	11	4
1101	01	$-1+j$	11	4
1110	10	$-1-j$	11	4
1111	11	$+1-j$	11	4

Как следует из таблицы, передача информационных бит производится в определенном порядке: сначала передаются пространственные биты с антенным индексом, затем символьные биты звездной диаграммы синхронно с пространственными битами.

При оценке ошибок и емкости канала ММО при SM модель канала отличается от традиционной модели (1) уточнением:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} = \mathbf{H}_l \mathbf{S}_l + \mathbf{n}. \quad (6)$$

$\mathbf{S}_l = s_l$ – комплексные сигнальные символы звездной диаграммы (QAM, PSK и т.д.), которые передаются активными антеннами с индексом l по нормализованному каналу $\mathbf{H}_l = h_l$, равному пространственному символу. При этом $\mathbf{n}$ – матрица аддитивного белого гауссовского шума с нулевым средним, ковариационной матрицей $\sigma_n^2 I_{N_r}$ и $OCSI = 1/\sigma_n^2$.

Вероятность ошибки при приеме сигналов SMTs и их передаче через плоский канал Релея в общем виде определяется уравнением [4]:

$$P_{error} = Q\left(\sqrt{\frac{\|h_\ell s_l - h_{\tilde{\ell}} s_{\tilde{l}}\|_F^2}{2\sigma_n^2}}\right) = Q\left(\sqrt{\sum_{r=1}^{N_r} \gamma_r^{SM}}\right) = Q\left(\sqrt{v^{SM}}\right), \quad (7)$$

где h_l – l -ый столбец матрицы $\mathbf{H}$ размера $N_r \times N_t$, пространственный символ передачи, $h_{\tilde{\ell}}$ – $\tilde{l}$ -ый столбец матрицы $\mathbf{H}$ размера $N_r \times N_t$, пространственный символ приема,

$$Q(x) = \frac{1}{2\pi} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt,$$

$$\gamma_r^{SM} = \frac{|h_{\ell,r} s_l - h_{\tilde{\ell},r} s_{\tilde{l}}|^2}{2\sigma_n^2},$$

где $h_{\ell,r}$ – r -ый элемент вектор-столбца $\mathbf{h}_\ell$ длины N_r ,

а $v^{SM} = \sum_{r=1}^{N_r} \gamma_r^{SM}$ – случайная величина, распределенная по критерию «хи-квадрат», с функцией распределения вероятностей

$$p_{v^{SM}}(v^{SM}) = \frac{1}{\Gamma(N_r)(\bar{\gamma}^{SM})^{N_r}} (v^{SM})^{(N_r-1)} \exp\left(-\frac{v^{SM}}{\bar{\gamma}^{SM}}\right),$$

где $\bar{\gamma}^{SM}$ – средняя величина, заданная выражением

$$\bar{\gamma}^{SM} = \frac{1}{2\sigma_n^2} \times \begin{cases} |s_l - s_{\tilde{l}}|^2 & \text{при } \tilde{l} = l, \\ |s_l|^2 + |s_{\tilde{l}}|^2 & \text{при } \tilde{l} \neq l. \end{cases}$$

Таким образом, средняя вероятность ошибки будет равна

$$P((\mathbf{h}_\ell, s_l) \rightarrow (\mathbf{h}_{\tilde{\ell}}, s_{\tilde{l}})) = E_{v^{SM}} \{P_{error}\} = (\alpha_a^{SM})^{N_r} \sum_{i=0}^{N_r-1} \binom{N_r-1+i}{i} [1 - \alpha_a^{SM}]^i, \quad (8)$$

где $\alpha_a^{SM} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\tilde{\gamma}^{SM}/2}{1 + \tilde{\gamma}^{SM}/2}}\right)$. Отметим, что если v – случайная величина, распределенная по критерию «хи-квадрат», тогда

$$\begin{aligned}
E_v \{Q(\sqrt{v})\} &= \int_v p_v(v) Q(\sqrt{v}) dv = \\
&= \int_v \frac{1}{\Gamma(N_r)(\tilde{\gamma})^{N_r}} v^{(N_r-1)} \exp\left(-\frac{v}{\tilde{\gamma}}\right) Q(\sqrt{v}) dv = \\
&= (\alpha_a)^{N_r} \sum_{i=0}^{N_r-1} \binom{N_r-1+i}{i} [1-\alpha_a]^i,
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\text{где } \alpha_a = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\tilde{\gamma}/2}{1+\tilde{\gamma}/2}} \right).$$

Расчет по формулам (7) – (9) при различном числе антенн приведен на рис. 7.

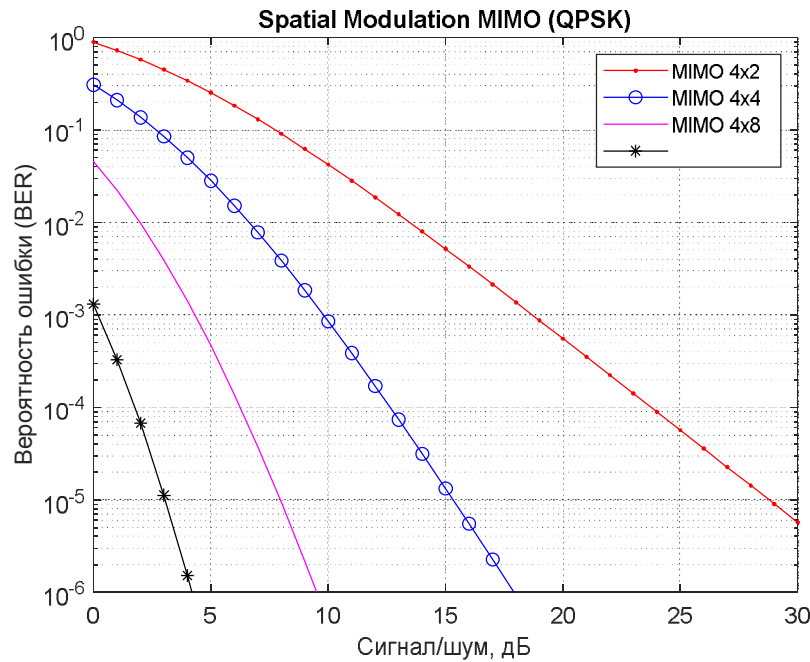


Рис. 7. Средняя вероятность ошибки для SM при различном числе приемных антенн N_r

И наконец, средняя вероятность ошибки для SM-модуляции при передаче сигналов через канал Релея с требуемой спектральной эффективностью определяется уравнением:

$$BER = \frac{1}{2^\eta} \sum_{\ell, l} \sum_{\ell, l} \frac{e_{\ell, l}^{\ell, l}}{\eta} (\alpha_a^{SM})^{N_r} \sum_{i=0}^{N_r-1} \binom{N_r-1+i}{i} [1-\alpha_a^{SM}]^i, \tag{10}$$

где η – требуемая спектральная эффективность для SM-модуляции,

$e_{\ell, l}^{\ell, l}$ – количество ошибочных бит, связанных с событием вероятности ошибки.

Уравнение (10) и рис. 7 показывают, что с увеличением числа приемных антенн существенно уменьшается вероятность ошибки. Это справедливо для всех вариантов SM модуляции, поэтому далее ограничимся сравнительными оценками вероятности ошибки для различных вариантов SM для некоррелированного канала Релея при полной информации на передатчике и приемнике.

На рис. 8 приведено сравнение большинства типов пространственной модуляции для системы MIMO 4x4 и используемой модуляции QPSK/4-QAM. По рисунку видно, что наименьшей вероятностью ошибки обладает DSM-модуляция. При неизменной вероятности ошибки DSM имеет выигрыш ОСШ в 3 дБ относительно SM-модуляции, SM имеет выигрыш ОСШ в 1 дБ относительно GSM-модуляции, GSM имеет выигрыш ОСШ в 2 дБ относительно QSM-модуляции, QSM имеет выигрыш ОСШ в 2 дБ относительно GQSM-модуляции.

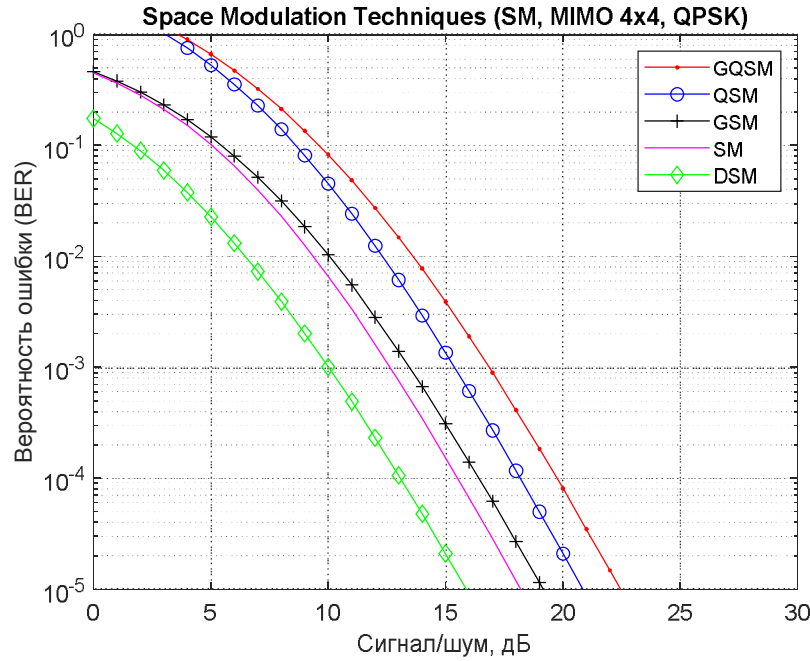


Рис. 8. Средняя вероятность ошибки для различных типов SM-модуляции

Немаловажную роль в современных технологиях системы MIMO играет анализ производительности сети. Для понимания разницы между классической системой MIMO и SMTs получена взаимная информация о пространственном мультиплексировании. В системах SMX не существует пространственных символов, а только символы сигналов. Входящая последовательность бит данных модулируется комплексными символами сигналов. И эти символы используются только для передачи информации: N_t символов будет одновременно передано с N_t передающих антенн.

По определению взаимная информация $I(\mathbf{X}; \mathbf{Y})$ – это количество информации, полученной о переданном векторном пространстве $\mathbf{X}$, зная принятое векторное пространство $\mathbf{Y}$. Взаимная информация для SMX-систем определяется формулой:

$$I(\mathbf{X}; \mathbf{Y}) = E_{\mathbf{H}} \{I(\mathbf{X}; \mathbf{Y} | \mathbf{H})\} = E_{\mathbf{H}} \{H(\mathbf{Y} | \mathbf{H}) - H(\mathbf{Y} | \mathbf{X}, \mathbf{H})\}, \quad (11)$$

где $H(\cdot)$ – функция энтропии.

В SMTs информационные биты модулируются пространственным символом $\mathcal{H}_\ell$ и символом сигнала $\mathcal{S}_\ell$. Поэтому в этом случае взаимная информация – это количество информации, полученной о пространственной и сигнальной диаграмме созвездий $\mathcal{H}$ и $\mathcal{S}$, зная принятое векторное пространство $\mathbf{Y}$. Тогда взаимная информация определяется формулой:

$$I(\mathcal{H}, \mathcal{S}; \mathbf{Y}) = H(\mathbf{Y}) - H(\mathbf{Y} | \mathcal{H}, \mathcal{S}). \quad (12)$$

При вычислении емкости сети SMTs информационные биты преобразуются в зависимости от индекса активной передающей антенны ℓ , а не от разных $\mathcal{H}_\ell$ пространственных символов. Следовательно, взаимная информация будет записана как

$$I(\ell, \mathcal{S}; \mathbf{Y} | \mathbf{H}) = E_{\ell} \{I(\mathcal{S}, \mathbf{Y} | \ell, \mathbf{H})\} + I(\ell; \mathbf{Y} | \mathbf{H}). \quad (13)$$

Емкость системы SMTs получается максимизацией взаимной информации с выбором функции распределения вероятности $p_{\mathcal{S}}$ и будет равна:

$$C = E_{\mathbf{H}} \left\{ \max_{p_{\mathcal{S}}} \{I(\ell, \mathcal{S}; \mathbf{Y} | \mathbf{H})\} \right\} = E_{\mathbf{H}} \left\{ \max_{p_{\mathcal{S}}} \{E_{\ell} \{I(\mathcal{S}, \mathbf{Y} | \ell, \mathbf{H})\}\} + I(\ell; \mathbf{Y} | \mathbf{H}) \right\} = E_{\mathbf{H}} \{C_1 + C_2\}, \quad (14)$$

где предполагается, что функция распределения вероятности p_s , которая максимизирует C_1 , также будет максимизировать и C_2 .

На рис. 9 отображена емкость системы SMTs для различных типов SSK (а) и SM (б) модуляций для MIMO 4x4 и 4-QAM/QPSK схемы модуляции.

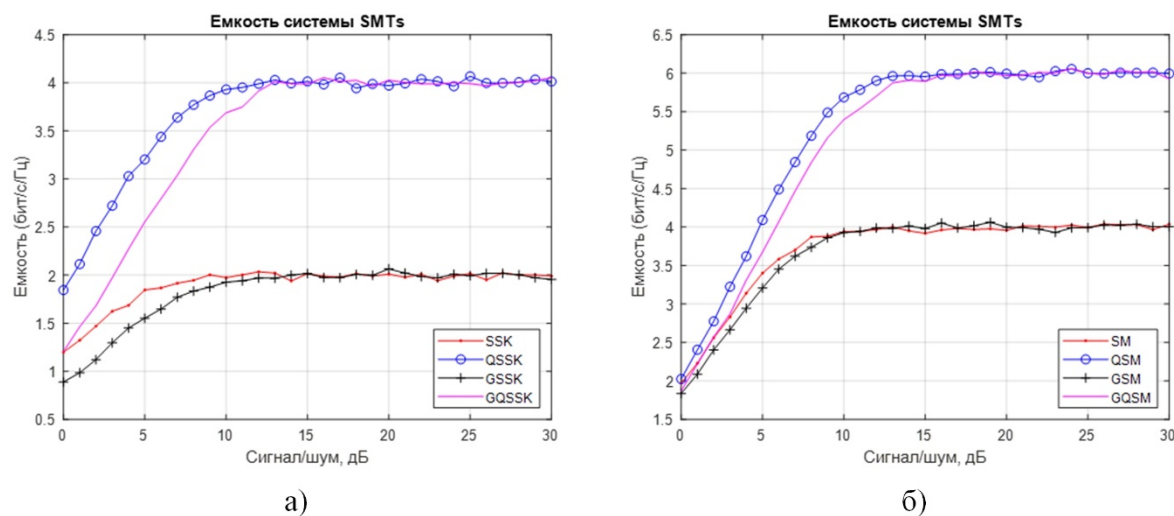


Рис. 9. Емкость системы SMTs

Для сравнения с SMTs на рис. 10 приводится емкость М-арных схем модуляций. Видно, что емкость SSK- и GSSK-систем соответствует емкости для схемы модуляции QPSK, а емкость QSSK и GQSSK в 2 раза выше. Для систем же SM и GSM емкость выше в 2 раза относительно QPSK, а для QSM и GQSM – в 3 раза.

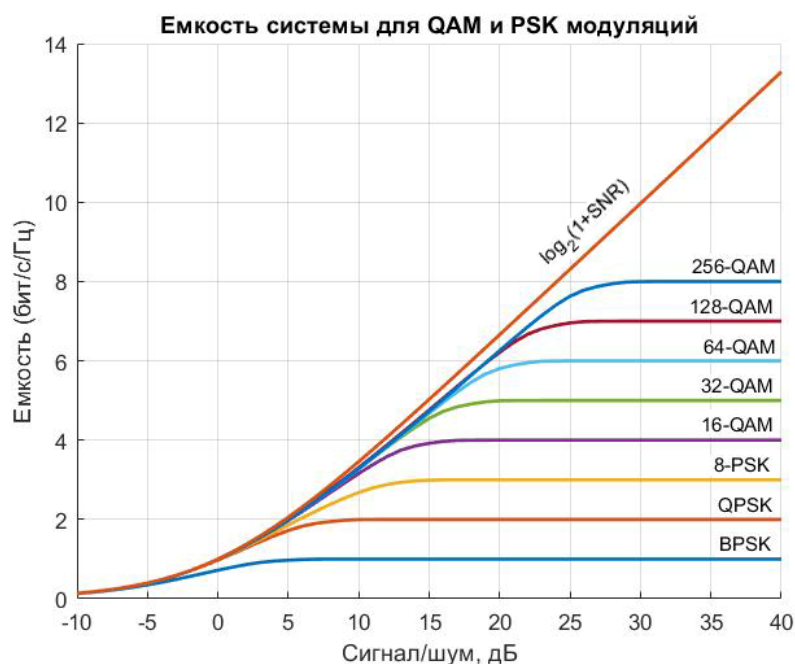


Рис. 10. Емкость системы для М-арных схем модуляций

На рис. 11 отображена емкость системы MIMO в зависимости от используемого числа приемных и передающих антенн.

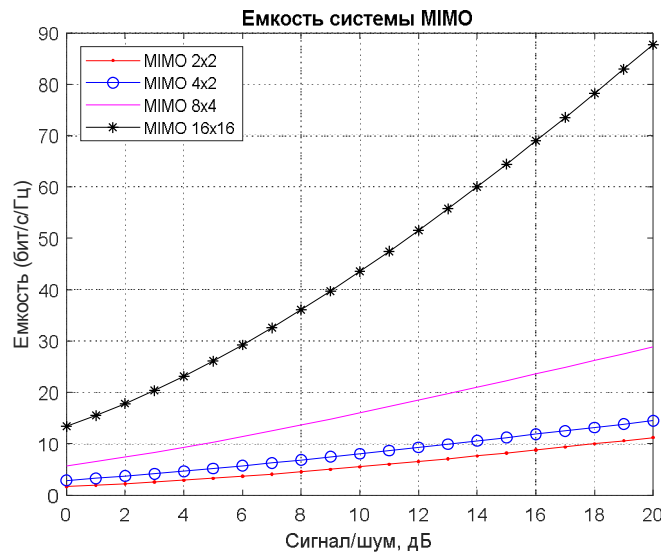


Рис. 11. Емкость системы MIMO

5. Характеристики технологии селекции передающих антенн

Метод *селекции передающих антенн* (*TAS – Transmit Antenna Selection*) заключается в том, что антенная система представляется в виде выбранной последовательности одиночных излучателей информационных сигналов. Выбор излучателя осуществляется на основе параметров канала, например, «хорошего канала», который определяется приемной антенной решеткой и по обратному каналу передается передатчику для выбора активной антенны. Этот метод напоминает схему SIMO (одна передающая антенна и много приемных) с *MRC* селективной обработкой в приемнике, но с существенным дополнением – обработка сигнала проводится не по одной искаженной копии, а по нескольким, что уменьшает вероятность ошибки.

В основу моделирования производительности сети положен неселективный канал Релея с комбинаторной обработкой узкополосных сигналов в приемнике.

Сравнение методов формирования сигнала на передачу приведено на рис. 12, что позволяет выбрать наилучший из методов, получая наименьшую вероятность ошибки.

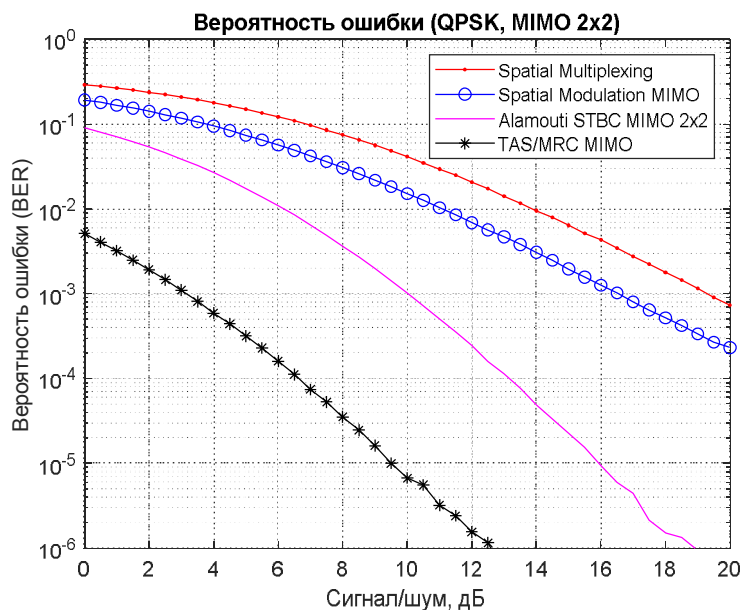


Рис. 12. Вероятность ошибки для различных систем MIMO

6. Заключение

В статье представлены результаты сравнительного анализа новых технологий MIMO – пространственной модуляции и селекции передающих антенн с действующими технологиями – пространственным мультиплексированием и пространственно-временным кодированием. Полученные расчетные графики показывают, что технологии SM имеют преимущества в емкости системы и энергетической эффективности, а технологии TAS – в меньшей вероятности ошибки. Эти преимущества возрастают с увеличением числа антенн, что гармонирует с требованиями пятого поколения.

Литература

1. *Kumbhani B., Kshetrimayum R. S.* MIMO Wireless Communications over Generalized Fading Channels. CRC Press, 2017.
2. *Safak M.* Digital Communications. Wiley, 2017.
3. *Wen M., Cheng X., Yang L.* Index Modulation for 5G Wireless Communications. Springer, 2017.
4. *Mesleh R., Alhasssi A.* Space Modulation Techniques. Wiley, 2018.
5. *Kanatas A. G., Nikita K. S., Mathiopoulos P.* New Directions in Wireless Communications Systems. From Mobile to 5G. CRC Press, 2018.
6. *Duong T. Q., Chu X., Suraveera H. A.* Ultra-dense Networks for 5G and Beyond. Wiley, 2019.
7. *Петров В. П., Якушев И. Ю.* Исследование производительности MIMO систем пятого поколения в неселективном канале Релея // VI Международная научно-практическая конференция «Технологии разработки и отладки сложных технических систем» на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019.
8. *Гантмахер Ф. Р.* Теория матриц. М.: Наука, 1967.

Статья поступила в редакцию 22.05.2019.

Петров Виктор Петрович

д.т.н., профессор, профессор кафедры систем мобильной связи СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: petrov@sibsutis.ru.

Якушев Игорь Юрьевич

аспирант кафедры систем мобильной связи СибГУТИ, e-mail: yakushevigor@mail.ru.

Modern Technologies in MIMO System

V.P. Petrov, I.Yu. Yakushev

In the paper MIMO systems with various technologies for optimizing system performance in a non-selective Rayleigh channel have been considered. The focus is on a relatively new antenna technologies recommended for fifth-generation networks: Spatial Modulation and Transmit Antenna Selection technologies. Formulas of BER and channel capacity have been given as well as graphs based on them for characteristics comparison.

Keywords: 5G, BER, MIMO, Rayleigh fading channel, channel capacity, antenna technology.