

ТЕСТИРОВАНИЕ MIMO-СИСТЕМ:

решения компании Agilent

Е.Николаев

Системы на основе технологий MIMO (Multiple Input – Multiple Output, множественный вход – множественный выход) получают все большее распространение в сетях беспроводной связи. Они обеспечивают заметное увеличение пропускной способности и надежности линий связи. Использование MIMO-технологий уже предусмотрено в ряде стандартов беспроводной связи, в частности HSDPA, IEEE 802.11n (Wi-Fi), IEEE 802.16e (мобильный WiMAX), Long-Term Evolution (LTE). Поэтому для разработчиков аппаратуры беспроводной связи важно иметь удобные и эффективные средства тестирования систем MIMO. Компания Agilent создала несколько приборов для решения таких задач и разработала схемы тестирования с использованием этих приборов. Рассмотрим, следуя [1], решения Agilent для тестирования MIMO-систем.

Традиционные схемы тестирования беспроводных устройств основаны на подключении их кабелем к эмулятору беспроводного канала, который, в свою очередь, подсоединен к генератору, воспроизводящему сигнал базовой станции (БС). Такая схема позволяет имитировать и многократно воспроизводить различные условия распространения сигналов. Но она не учитывает свойств антенны (диаграммы направленности, коэффициента усиления, поляризации и др.), а также взаимодействия антенны с остальными блоками тестируемого устройства. Для того чтобы исследовать влияние антенн на работу каналов связи нужно использовать методы, где сигнал от базовой станции (или ее эмулятора) передается к приемнику по беспроводному каналу. Использование таких методов предусмотрено многими спецификациями, в том числе 3GPP TS 34.114.

Методы тестирования в MIMO-системах обладают рядом особенностей, вытекающих из специфики генерации, распространения и приема сигналов в этих системах. Так, даже в наиболее простой MIMO-системе 2x2 (две излучающие и две приемные антенны) сигналы распространяются по многим путям, и каждая приемная антенна получает сигналы от каждой из передающих антенн (рис.1а) (здесь и далее рисунки из [1]). Пропускная способность MIMO-систем существенно зависит от степени корреляции сигналов, принимаемых различными антеннами. На корреляцию влияют различные факторы, связанные как со свойствами канала распространения сигнала, так и с характеристиками антенн. Например,

антенны MIMO-устройства могут иметь различные диаграммы направленности (рис.1б). Все эти факторы необходимо учитывать при построении системы тестирования MIMO-устройств.

Важным моментом при построении тестовой системы является выбор такой модели канала распространения сигналов, которая достаточно точно отражает реальные условия и в то же время достаточно проста в реализации. Тестовые системы, разработанные специалистами компании Agilent, основаны на определенных моделях MIMO-каналов.

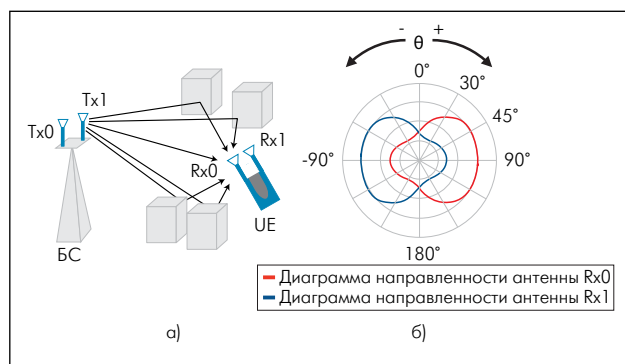


Рис.1. Схема простой 2x2 MIMO-системы (а) и диаграммы направленностей антенн устройства пользователя (UE) (б)

МОДЕЛИ МИМО-СИСТЕМ

Статистическая модель

В этой модели среда распространения сигналов описывается с помощью групп отражающих объектов, называемых кластерами (рис.2). Такие кластеры хорошо моделируют, например, здания с большим числом архитектурных деталей. При этом отражательные свойства кластера описываются с помощью статистических моделей. Каждый кластер характеризуется углом выхода излучения из массива передающих антенн $\theta_{n, AoD}$ (AoD – angle of departure), углом падения излучения из массива принимающих антенн $\theta_{n, AoA}$ (AoA – angle of arrival), расходимостями $\sigma_{n, AoD}$ и $\sigma_{n, AoA}$ (см. рис.2).

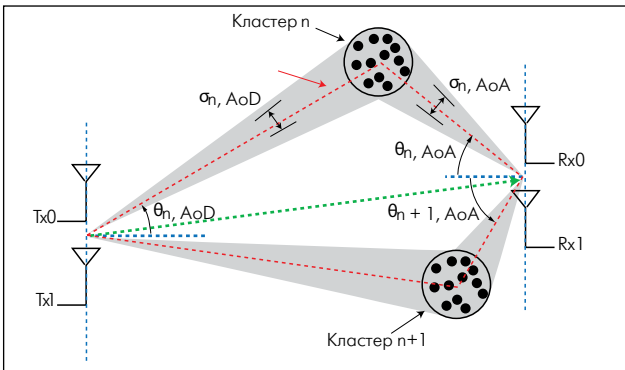


Рис.2. Схема, иллюстрирующая статистическую модель МИМО-системы

Полная энергия для каждого угла вычисляется суммированием вкладов от всех кластеров. Это итоговое распределение, нормированное на единицу, называют угловым спектром мощности (power angle spectrum – PAS) [1, 2]. Во многих случаях его можно приближенно заменить распределениями Лапласа или Гаусса – в зависимости от моделируемой ситуации. Например, распределение Лапласа используется для моделирования городской застройки. Спектр мощности, рассчитанный для схемы, показанной на рис.2, имеет два выраженных пика при углах $\theta_{n, AoA}$ и $\theta_{n+1, AoA}$, соответствующих вкладам каждого из двух кластеров (рис.3а). С хорошей точностью этот спектр мощности можно заменить двумя распределениями Лапласа (рис.3б). При этом стандартные отклонения $\sigma_{n, AoA}$ и $\sigma_{n+1, AoA}$ соответствуют расходимостям потоков излучения от кластеров (см. рис.2).

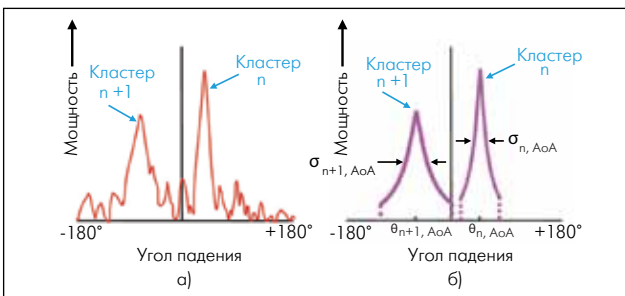


Рис.3. Угловые спектры мощности МИМО-системы: а – реальный, б – моделируемый распределениями Лапласа

Геометрическая модель с лучами равной интенсивности

Модель, основанную на статистическом описании свойств кластера, можно развить, используя отдельные лучи для характеристики вклада различных отражающих элементов, входящих в состав кластера, в поток излучения. Считается, что каждый из лучей обладает равной интенсивностью, но отражающие элементы распределяются по углам таким образом, чтобы их суммарный вклад моделировал требуемый угловой спектр мощности, например, распределение Лапласа с определенным стандартным отклонением (рис.4, 5). Консорциум 3GPP разработал технические спецификации для описания МИМО-каналов с помощью таких многолучевых моделей. Спецификации описывают требования к моделям для различных типов городской застройки. Каждая модель содержит шесть кластеров с определенными AoD и AoA, а каждый кластер представлен 20 лучами равной интенсивности.

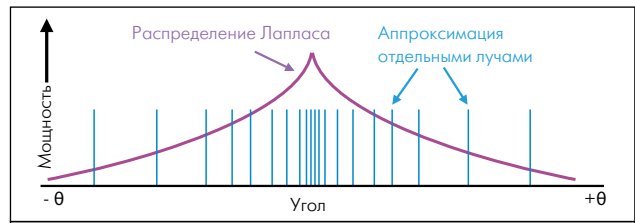


Рис.4. Аппроксимация распределения Лапласа для углового спектра мощности с помощью 20 лучей равной интенсивности

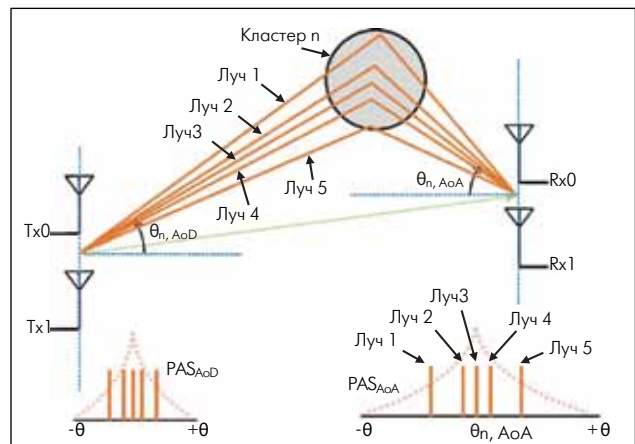


Рис.5. Схема, иллюстрирующая многолучевую модель МИМО-системы

Геометрическая модель с "квантованным" спектром мощности

Во многих случаях использование моделей на основе многих лучей равной интенсивности может оказаться технически слишком сложным. Но простое сокращение числа лучей приводит к недопустимым погрешностям. Поэтому нужны иные подходы к описанию МИМО-каналов на основе геометрических моделей. Один из таких подходов основан на использовании нескольких лучей различной интенсивности. Эту процедуру можно рассматривать как «квантование» углового спектра

мощности (рис.6). Угловое распределение лучей и их интенсивность подбирают таким образом, чтобы наиболее точно описать реальный угловой спектр мощности ММО-канала.

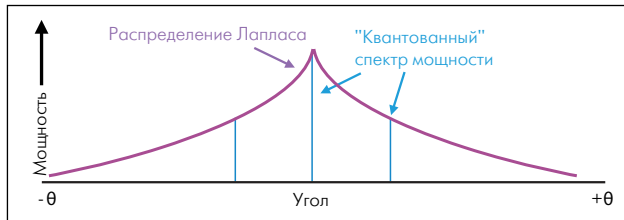


Рис.6. Аппроксимация распределения Лапласа для углового спектра мощности с помощью трех лучей различной интенсивности

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ММО-СИСТЕМ

Как уже говорилось, пропускная способность ММО-систем существенно зависит от корреляции между сигналами, принимаемыми различными антеннами пользовательского устройства. Пропускная способность $M \times N$ ММО-системы может быть задана выражением [1]:

$$C_{\text{ММО}} = \log_2 \left[\det \left(I_N + \frac{\gamma}{M} \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^H \right) \right],$$

где I_N – единичная матрица $N \times N$, γ – среднее значение отношения сигнал/шум приемных антенн, \mathbf{H}^H – сопряженно-транспонированная матрица, \mathbf{H} – матрица нормализованных коэффициентов канала, которая учитывает эффекты пространственной корреляции в угловом спектре мощности и диаграмме направленности антенны.

При разработке ММО-системы важно исследовать влияние на ее пропускную способность как канала распространения сигнала, так и приемных и передающих антенн. Для этого нужно разделить влияние данных факторов. Но как это сделать? Оказывается, что выражение для матрицы канала \mathbf{H} можно представить таким образом, чтобы вклады канала и антенн учитывались отдельно. Затем нужно построить схему эксперимента так, чтобы измерить каждый из этих вкладов. И, наконец, определить пропускную способность системы на основе данных измерений. При таком подходе можно протестировать и различные варианты антенн – с разными диаграммами направленности, поляризациями, расстояниями друг от друга – и разные каналы, соответствующие тем или иным средам распространения сигнала.

Сначала посмотрим, как выглядят математические модели для матриц \mathbf{H} .

Модель для \mathbf{H} при статистическом описании ММО-канала

В этом случае для характеристики корреляционных связей в ММО-системе удобно использовать так называемую матрицу пространственной корреляции \mathbf{R} . При определенных условиях ее можно представить в виде:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\text{tr}\{\mathbf{R}_{\text{RX}}\}} \mathbf{R}_{\text{TX}} \otimes \mathbf{R}_{\text{RX}}$$

Здесь \mathbf{R}_{TX} – матрица пространственной корреляции на стороне передатчика, \mathbf{R}_{RX} – матрица пространственной корреляции на стороне передатчика, $\text{tr}\{\cdot\}$ – след матрицы, \otimes – произведение Кронекера.

Матрицы \mathbf{R}_{TX} и \mathbf{R}_{RX} для 2×2 ММО-системы определяются выражениями:

$$\mathbf{R}_{\text{TX}} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{\text{TX},12} \\ (\rho_{\text{TX},12})^* & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_{\text{RX}} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{\text{RX},12} \\ (\rho_{\text{RX},12})^* & 1 \end{bmatrix},$$

где $\rho_{\text{TX},12}$ – коэффициент корреляции между антеннами передатчика, $\rho_{\text{RX},12}$ – коэффициент корреляции между антеннами приемника, $(\cdot)^*$ – комплексно сопряженная величина.

В свою очередь коэффициенты корреляции выражаются через функции, описывающие угловые спектры мощности (PAS), характеризующие свойства ММО-канала, и диаграммы направленности антенн $G(\theta)$. В 2×2 ММО-системе выражения для коэффициентов корреляции имеют вид:

$$\rho_{\text{TX},12} = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} e^{-j\frac{d}{\lambda} \sin \theta} \text{PAS}_{\text{TX}}(\theta) G_{\text{TX}}(\theta) d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} \text{PAS}_{\text{TX}}(\theta) G_{\text{TX}}(\theta) d\theta},$$

$$\rho_{\text{RX},12} = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} e^{-j\frac{d}{\lambda} \sin \theta} \text{PAS}_{\text{RX}}(\theta) G_{\text{RX}}(\theta) d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} \text{PAS}_{\text{RX}}(\theta) G_{\text{RX}}(\theta) d\theta},$$

где λ – длина волны, d – расстояние между антеннами.

Из приведенных выражений видно, что, во-первых, корреляционные связи в приемных и передающих антеннах определяются независимо друг от друга, и, во-вторых, в выражениях для коэффициентов корреляции влияние канала и антенны учитывается не связанными между собой функциями. Это именно то, что и требуется для оценки вклада каждой из частей ММО-системы в ее пропускную способность.

При известных матрицах \mathbf{R}_{TX} и \mathbf{R}_{RX} можно определить матрицу \mathbf{H} с помощью специального алгоритма, разработанного компанией Agilent [1].

Отметим, что приведенные выражения для коэффициентов корреляции являются упрощенными. Они предполагают, что диаграммы направленности обеих антенн передатчика и приемника одинаковы. Однако рассмотренный подход в целом применим и в случае антенн с различными диаграммами направленности (например, таких как на рис.1), а также с различными поляризациями. В этих случаях нужно использовать модифицированные выражения для коэффициентов корреляции.

Модель для H при многолучевом описании MIMO-канала

В этой модели матрица канала вычисляется суммированием вкладов от различных рассеивающих элементов, расположенных в канале (см. рис.5). Так, в 2x2 MIMO-системе суммарный коэффициент канала, по которому распространяется излучение от антенны Tx1 до антенны Rx1, можно найти по формуле:

$$H(x_1, x_1) = \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M h_{n,m}(x_1, x_1)$$

Внешнее суммирование идет по кластерам, а внутреннее – по элементам внутри кластера. В модели 3GPP, как отмечалось выше, N=6, M=20.

В выражения для $h_{n,m}$ также, как в случае модели для статистического описания канала, входят функции, описывающие диаграммы направленности антенн.

Полная матрица канала определяется выражением:

$$H = \begin{bmatrix} H(x_1, x_1) & H(x_1, x_2) \\ H(x_2, x_1) & H(x_2, x_2) \end{bmatrix}$$

Описанные модели положены в основу экспериментальных схем для тестирования MIMO-систем, разработанных компанией Agilent.

СХЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Основная задача тестирования – исследовать влияние характеристик канала, по которому распространяются сигналы, и антенн на пропускную способность MIMO-систем. Компания Agilent разработала

несколько различных схем тестирования, позволяющих решать эту задачу.

Двухэтапная схема

Вспомним, что в моделях MIMO-систем вклады канала и антенн учитываются независимыми друг от друга функциями. Поэтому можно сначала измерить параметры антенны (диаграммы направленности), а затем математически скомбинировать их с известными свойствами канала, которые имитируются специальными приборами. Это и есть два этапа тестирования. Для их реализации компания Agilent использовала следующую схему. Излучающую антенну, имитирующую сигнал базовой станции, и тестируемое устройство помещают в безэховую камеру (рис.7). Ее параметры подбираются таким образом, чтобы исключить отраженные от стен камеры сигналы в зоне расположения тестируемого устройства (зоне молчания). Благодаря этому антенны тестируемого прибора принимают только прямые сигналы от антенн передатчика. Следовательно, измеряемые параметры принимаемого сигнала определяются только характеристиками антенны, а влиянием свойств канала можно пренебречь. Тестируемое устройство может вращаться в двух плоскостях – это позволяет проводить измерения при разных углах расположения его антенн и тем самым определить их диаграммы направленности, причем, если необходимо, при разных поляризациях.

На втором этапе тестирования измеренные параметры антенны комбинируются с параметрами MIMO-канала. Для их моделирования используется прибор

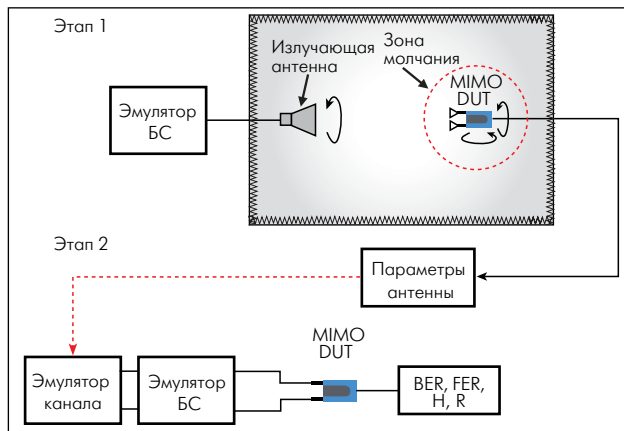


Рис.7. Тестовая схема для двухэтапного тестирования 2x2 MIMO-системы. DUT (device under test) – тестируемое устройство

N5106A PXB компании Agilent (рис.8) [3–5]. Он выполняет двойную функцию: эмулятора MIMO-каналов и генератора тестового сигнала. Работа в качестве эмулятора прибора включает имитацию затухания сигналов, т.е. реализацию функций фэйдера. Прибор N5106A PXB обеспечивает до четырех генераторов, до восьми фэйдеров и поддерживает тестирование 2x2, 2x4 и 4x2 MIMO-систем.



Рис.8. Прибор Agilent N5106A PXB

Модель MIMO-канала, имитируемая N5106A PXB в рассматриваемой схеме тестирования, может быть основана как на статическом подходе, так и на подходе, использующем многолучевое приближение.

В конечном итоге на выходе тестовой системы получаются значения BER, FER, матрицы пространственной корреляции R и матрицы канала H. На основе этих величин можно рассчитать пропускную способность MIMO-системы [1].

В экспериментах, проведенных компанией Agilent, сравнивались результаты, полученные при использовании различных моделей канала на одном и том же оборудовании. Моделировалась MIMO-система с двумя излучающими антеннами с одинаковыми диаграммами направленности и каналом, представленным одним кластером, излучение которого описывалось распределением Лапласа. Тестируемое устройство имело две антенны с разными диаграммами направленности (см. рис.1). Геометрическая (многолучевая) модель представляла собой один кластер с 20 излучающими объектами. Для каждой

Таблица 1а. Корреляционная матрица канала, полученная на основе геометрической модели

	Tx0 – Rx0	Tx0 – Rx1	Tx1 – Rx0	Tx1 – Rx1
Tx0 – Rx0	1,000	0,6670	0,9519	0,6687
Tx0 – Rx1	0,6670	1,000	0,6496	0,9550
Tx1 – Rx0	0,9519	0,6496	1,000	0,6672
Tx1 – Rx1	0,6687	0,9550	0,6672	1,000

Таблица 1б. Корреляционная матрица канала, полученная на основе статистической модели

	Tx0 – Rx0	Tx0 – Rx1	Tx1 – Rx0	Tx1 – Rx1
Tx0 – Rx0	1,000	0,7050	0,9547	0,6721
Tx0 – Rx1	0,7050	1,000	0,6721	0,9547
Tx1 – Rx0	0,9547	0,6721	1,000	0,7050
Tx1 – Rx1	0,6721	0,9547	0,7050	1,000

Таблица 1в. Разница между геометрической и статистической моделями

	Tx0 – Rx0	Tx0 – Rx1	Tx1 – Rx0	Tx1 – Rx1
Tx0 – Rx0	0	-0,0380	-0,0027	-0,0034
Tx0 – Rx1	-0,0380	0	-0,0225	0,0003
Tx1 – Rx0	-0,0027	-0,0225	0	-0,0378
Tx1 – Rx1	-0,0034	0,0003	-0,0378	0

модели были получены корреляционные матрицы канала (табл.1). Их анализ показывает, что результаты, которые дают различные модели, достаточно близки.

Схема с несколькими излучателями

Во втором методе тестирования модель MIMO-канала реализуется с помощью нескольких излучающих антенн (рис.9). Все они вместе с тестируемым устройством также помещены в безэховую камеру. Сигнал, передаваемый каждой антенной, формирует-

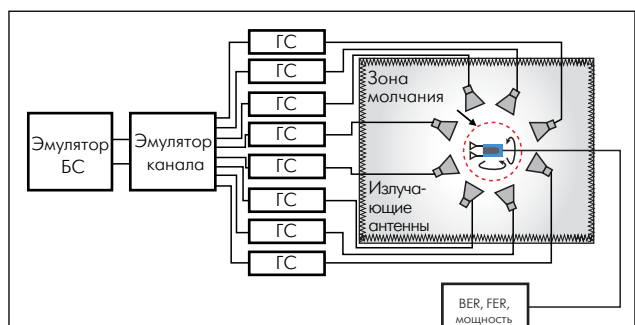


Рис.9. Тестовая схема для тестирования 2x2 MIMO-системы с использованием нескольких излучающих антенн. ГС – генератор сигнала

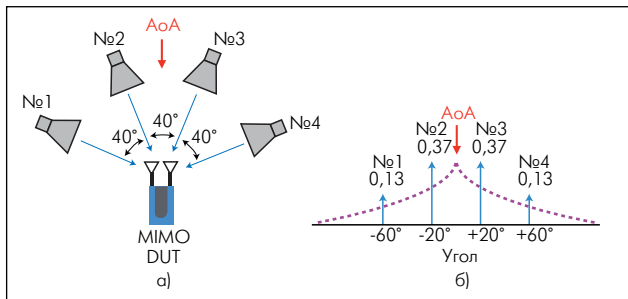


Рис.10. Тестовая схема, имитирующая канал с одним кластером:
а – конфигурация системы,
б – угловой спектр мощности

ся с помощью эмулятора базовой станции, эмулятора канала (обе эти функции выполняет прибор Agilent N5106A PXB) и генератора сигналов, преобразующего сигнал от Agilent N5106A PXB в сигнал радиочастотного диапазона. Таким генератором служит прибор типа Agilent MXG. Каждая антенна может имитировать один из лучей распространения сигнала в геометрической модели МИМО-канала или в модели с «квантованным» спектром мощности. Интенсивность излучения различных антенн может быть различна – это достигается за счет использования фэйдеров в Agilent N5106A PXB.

Из практических соображений – простоты системы, быстроты калибровки и малого времени проведения тестов – предпочтительно использовать возможно меньшее число излучающих антенн. Этим требованиям лучше всего отвечает модель с «квантованным» спектром мощности. Математическое моделирование МИМО-систем показало, что небольшое число антенн с оптимально подобранными характеристиками может обеспечить вполне удовлетворительную точность. Например, использование трех тестовых антенн, сгруппированных так, чтобы смоделировать излучение от одного кластера, дает результат, очень близкий к теоретической модели, использующей 20 излучающих элементов внутри кластера.

Компания Agilent провела ряд измерений с использованием схем с несколькими излучателями. В одном из них использовалась модель с лапласовским распределением углового спектра мощности. Тестовая конфигурация включала четыре излучающие антенны, расположенные с угловыми интервалами 40° (рис.10). На основе математического моделирования интенсивности излучения антенн были подобраны таким образом, чтобы соответствовать излучению кластера с 20 элементами в многолучевой модели. При суммарной мощности излучения, нормированной на единицу, относительная мощность излучения антенн №1 и №4 составляла 0,13, а антенн №2 и №3 – 0,37 (см. рис.10б). В качестве тестируемого устройства выступала сетевая карта стандарта IEEE 801.11n с двумя антеннами. Устройство поворачивалось на 360° с инкрементом 30°. Была измерена пропускная способность МИМО-устройства в зависимости от его ориентации при различных уровнях мощности излучения (рис.11).

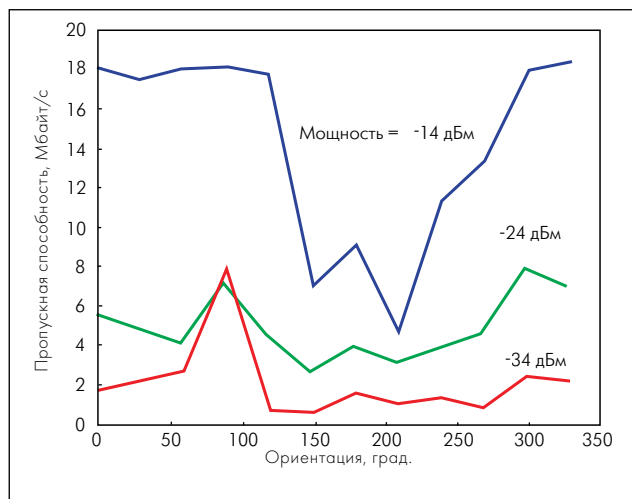


Рис.11. Пропускная способность МИМО-устройства для канала с одним кластером

В другом эксперименте использовалась модель с двумя кластерами. Расположение антенн было таким же, как в первом эксперименте (рис.12). Излучение каждого кластера моделировалось тремя антеннами. Поэтому две из четырех антенны (№2 и №3) моделировали оба кластера (см. рис.12). Также была определена пропускная способность МИМО-устройства (рис.13).

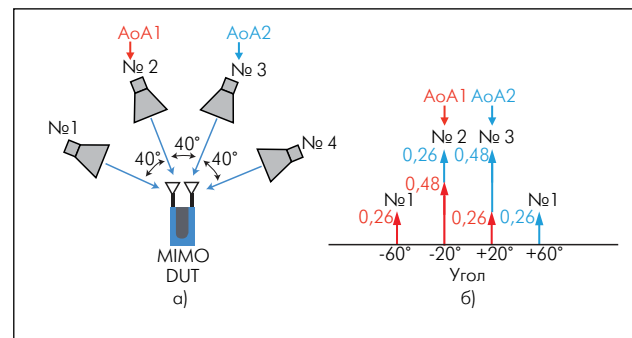


Рис.12. Тестовая схема, имитирующая канал с двумя кластерами: **а** – конфигурация системы, **б** – угловой спектр мощности

Сравнение результатов экспериментов показывает, что при малой мощности излучения (-14 дБм) модель с двумя кластерами имеет большую пропускную способность, чем модель с одним кластером. Это подтверждает, что канал распространения излучения с большим числом рассеивающих объектов увеличивает производительность МИМО-системы. При малых мощностях излучения разница между двумя моделями незначительна. Авторы экспериментов объясняют это тем, что при низкой мощности отношение сигнал/шум слишком мало для того, чтобы мог проявиться эффект от применения дополнительных путей распространения сигнала.

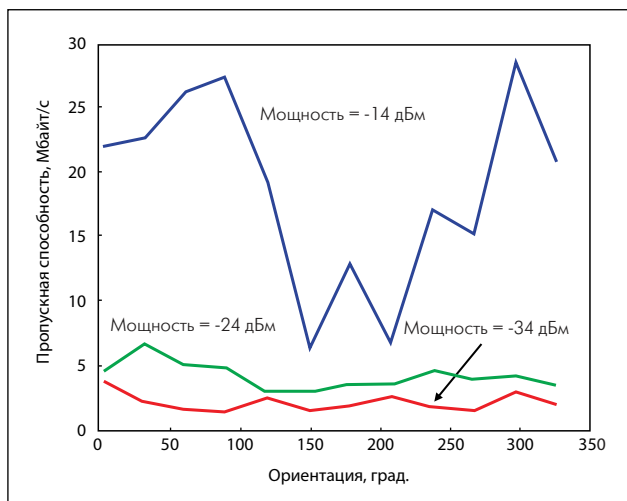


Рис. 13. Пропускная способность MIMO-устройства для канала с двумя кластерами

Схема с реверберационной камерой

В третьей схеме тестирования компания Agilent использовала реверберационную камеру. Это полностью экранированное замкнутое пространство с металлическими стенками, работающее как объемный резонатор. Моды резонатора «перемешиваются» с помощью вращающихся металлических пластин – «смесителя мод» (рис.14). В результате формируется распределение сигналов, хорошо имитирующее среду внутри помещений. Поскольку канал можно считать изотропным, нет необходимости вращать тестируемое устройство. Это существенно ускоряет проведение тестирования. Данные о результатах экспериментов в работе [1] не приводятся.

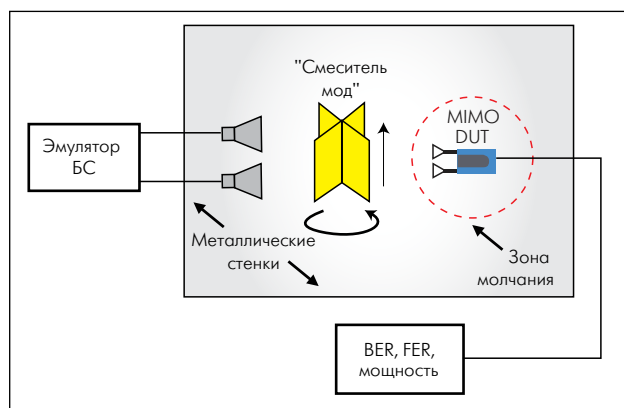


Рис. 14. Тестовая схема для тестирования 2x2 MIMO-системы с использованием реверберационной камеры

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕСТИРОВАНИЯ

Компания Agilent провела эксперимент по измерению пропускной способности системы с помощью различных тестовых схем: двухэтапной схемы и схемы с несколькими антеннами. В качестве тестового устройства использовалась сетевая карта MIMO стандарта HSDPA с двумя антеннами. Эксперимент показал, что

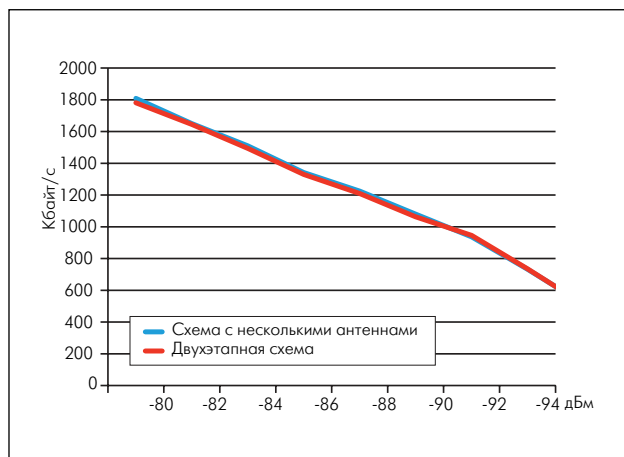


Рис. 15. Сравнение пропускных способностей MIMO-системы, полученных с помощью двухэтапной схемы и схемы с несколькими излучающими антеннами

оба метода дают близкие результаты в широком диапазоне мощности сигнала (рис.15).

В целом по результатам проведенных исследований специалисты компании Agilent делают следующие выводы [1]. Метод с реверберационной камерой прост в реализации и наименее затратен, но имеет ограниченное применение из-за однородного распределения каналов распространения излучения – такая конфигурация моделирует главным образом среду внутри зданий. Метод с множеством излучающих антенн обладает большой гибкостью и позволяет моделировать различные виды MIMO-каналов. Однако он оказывается весьма дорогостоящим и сложным в реализации. В этом методе также наиболее сложна калибровка оборудования и велико время измерений. Двухэтапный метод намного проще в реализации и дешевле. Кроме того, он позволяет реализовать обе модели MIMO-каналов: статистическую и многолучевую. Поскольку при этом результаты применения метода с несколькими излучающими антеннами и двухэтапного метода оказываются близки, то в большинстве случаев, по-видимому, именно двухэтапный метод окажется оптимальным для тестирования MIMO-систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Theory, Techniques and Validation of Over-the-Air Test Methods for Evaluating the Performance of MIMO User Equipment. – Agilent Application Note 5900-5858EN, December 2010.
2. MIMO Channel Modeling and Emulation Test Challenges. – Agilent Application Note 5989-8973EN, January 2010.
3. N5106A PXB Baseband Generator and Channel Emulator. – Data sheet 5989-8971EN, January 2011.
4. Agilent N5106A PXB Baseband Generator and Channel Emulator. – Agilent document 5990-5113EN December, 2009.
5. MIMO Receiver Test. Accurately Testing MIMO Receivers Under Real-World Conditions. – Agilent Application Note 5990-4045EN, January 2010.