

УДК 681.396.74

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ MIMO

**В.С. Сперанский**, профессор МТУСИ, к.т.н.

**И.Л. Евдокимов**, бакалавр МТУСИ

**Введение.** Создание и развитие технологии MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) мотивируется потребностью в увеличении скоростей передачи/приема данных в системах радиодоступа с сохранением необходимого уровня помехоустойчивости сигналов. Как известно, для улучшения характеристик помехоустойчивости и пропускной способности системы необходимо на физическом уровне обеспечить выигрыши помехоустойчивого кодирования и по скорости модуляции данных [1].

Системы MIMO дополнительно увеличивают пропускную способность за счет пространственного разнесения каналов и дают энергетический выигрыш при пространственно-временном кодировании (ЭВК).

Необходимость создания адекватных моделей каналов распространения MIMO обусловлена тем, что данная технология вошла в стадию своего бурного развития, всестороннего обсуждения и реализации сравнительно недавно, а применение она нашла пока только в системах стандартов 802.11n и WiMAX. Однако, несмотря на свое пока еще не очень широкое распространение, технология MIMO имеет достаточно высокий потенциал развития, о чем говорят результаты многочисленных экспериментов с различными приемными и передающими конфигурациями (различным числом антенных трактов).

Теоретически с возрастанием количества приемных и передающих трактов системы пропускная способность канала возрастает практически пропорционально росту числа антенн, однако бесконечному увеличению количества трактов препятствует усложнение методики разработки эффективных пространственно-временных кодов (основанных на так называемых ортогональных базисах). Это может сказаться на увеличении габаритов устройств.

Способы моделирования систем MIMO подразделяются на три категории [2]: физическое (детерминистское), стохастическое, имитационное.

Физическое моделирование предполагает наличие знаний о характеристиках предполагаемого канала распространения, таких как: ОСШ, характеристика рассеяния, распределение углов прихода лучей на приеме. Преимуществом физического моделирования является возможность выделить влияние измерительных приборов. Недостатком является то, что практически невозможно ввести и учесть абсолютно все требуемые физические параметры канала и оборудования, а учет малого количества характеристик зачастую не дает адекватного отражения поведения канала.

Стохастическое моделирование основано на известных математических соотношениях. Например, при стохастическом моделировании могут учитываться следующие параметры: число антенн на приеме и передаче; тип и характер замираний. Среди недостатков статистических методов можно назвать: невозможность выделения влияния измерительных приборов на результат, а также физических причин сложившейся обстановки.

Имитационное моделирование позволяет понять суть процессов, происходящих в различных трактах модели и учесть как физические, так и статистические характеристики моделируемого явления. В настоящей статье рассмотрено несколько вариантов моделей MIMO:

- IST METRA – модель узкополосного MIMO-канала для сетей третьего поколения UMTS

- STINGRAY – модель широкополосного канала с учетом возможного изменения конфигурации системы применительно к конкретным условиям распространения сигнала.

**Проект IST METRA.** Суть проекта [3] состояла в моделировании многоантенных узкополосных мобильных систем, изучении их эффективности в рамках взаимодействия абонентских и базовых радиостанций для вынесения рекомендаций относительно использования принципов MIMO в системах сотовой связи третьего поколения UMTS.

В процессе исследований проведено 99 экспериментов для различных сред, в ходе которых были получены характеристики пропускной способности каналов для шести различных сред распространения [4].

Основные цели проекта:

- исследование эффекта от использования адаптивных антенн в приемопередающих трактах мобильной и базовой станций;

- получение оценок статистических характеристик канала передачи;

- вынесение рекомендаций относительно используемого приемопередающего оборудования;

- расчет экономической выгоды от использования многоантенных мобильных систем;

- вынесение рекомендаций относительно используемых схем пространственно-временного кодирования.

Входные данные для этой модели – число  $M$  приемных и  $N$  передающих трактов; распределение углов прихода луча на приеме с заданными СКО и математическим ожиданием.

В модели METRA учитываются две причины искажения сигнала в канале: пространственная корреляция сигналов на приемном и передающем концах из-за близкой расположенности антенн; мультипликативные искажения сигнала вследствие влияния замираний.

Пусть импульсная характеристика канала в  $l$ -й момент времени отражается в матрице

$$\mathbf{H}(\tau) = \mathbf{H}_l = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1M} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{N1} & H_{N2} & \dots & H_{NM} \end{bmatrix},$$

где  $H_{nm}$  – импульсная характеристика канала при рассмотрении прихода сигнала  $n$ -го передающего тракта к  $m$ -му приемному.

Пространственная взаимная корреляция передаваемых сигналов по мощности описывается следующим образом [2]:

$$\rho_{n_1, n_2} = \langle |H_{n_1, m}^l|^2, |H_{n_2, m}^l|^2 \rangle, \quad (1)$$

корреляция сигналов на приемной стороне:

$$\rho_{n_1, n_2} = \langle |H_{n_1, m}^l|^2, |H_{n_2, m}^l|^2 \rangle. \quad (2)$$

В [5] показано, что общая пространственная корреляция определяется как:

$$\mathbf{P}_H = \mathbf{P}_H^{Tx} \mathbf{P}_H^{Rx},$$

где  $\mathbf{P}_H^{Tx}$  и  $\mathbf{P}_H^{Rx}$  – матрицы коэффициентов  $\rho$ , определяемых в (1) и (2).

На приемной стороне сигнал, восстановленный без учета шумовых составляющих [1]:

$$y(t) = N(\bar{\varphi}) \int \mathbf{H}(\tau) s(t - \tau) d\tau,$$

где  $s(t - \tau)$  – задержанная на  $\tau$  составляющая переданного сигнала,  $\tau = ld\tau$ ,  $N(\bar{\varphi})$  – распределение углов лучей, приходящих на приемные антенны [3].

По данным приведенной выше модели можно рассчитать пропускную способность канала с заданным числом приемных и передающих элементов:

$$C = B \log_2(\mathbf{I} + \frac{SNR}{L} \sqrt{\mathbf{P}_H^{Tx} \mathbf{H} \mathbf{P}_H^{Tx} \mathbf{H}^+} \sqrt{\mathbf{P}_H^{Rx}}),$$

где  $\mathbf{H}^+$  – эрмитово сопряжение матрицы  $\mathbf{H}$ .

В таблице представлены выигрыши в пропускной способности узкополосных много антенных систем относительно базовой модели  $1 \times 1$ .

Данная модель может применяться для анализа только узкополосных MIMO-систем, поскольку в ней не учитывается ряд характеристик и проблем, присущих широкополосным системам, таких как неравномерный доплеровский сдвиг по всему спектру сигнала.

**Проект STINGRAY.** Суть проекта состоит в предоставлении адекватной модели канала распространения для широкополосной системы OFDM-MIMO [4]. Цели проекта:

- реализация модели конфигурируемой системы на базе технологий пространственно-временного кодирования STC (Space-Time Coding) и MIMO;
- вынесение рекомендаций относительно применяемого оборудования, схем пространственно-временного кодирования, модуляции с целью максимизации спектральной эффективности систем фиксированного беспроводного доступа;
- разработка модели канала для беспроводных систем радиосвязи с использованием технологии MIMO в городских условиях.

В модели Stingray учитываются постоянное изменение характеристик канала, выражаемых матрицей  $\mathbf{H}_l$ , и непостоянство частотных характеристик канала.

Полагаем, что имеется  $L$  реализаций канала с номерами  $l = 0, 1, \dots, L - 1$ . Каждой реализации канала соответствует своя матрица:

$$\mathbf{H}_l = \begin{bmatrix} H_{l,1}^1 & \dots & H_{l,1}^M \\ \dots & \dots & \dots \\ H_{l,N}^1 & \dots & H_{l,N}^M \end{bmatrix} = [h_{l,0}, \dots, h_{l,M}] = \begin{bmatrix} h_{l,0} \\ \dots \\ h_{l,M} \end{bmatrix}^T.$$

Для учета частотных характеристик канала вычисляется преобразование Фурье для всех  $L$  реализаций канальной матрицы:

$$\mathbf{H}(\exp(2\pi\theta)) = \sum_{l=0}^{L-1} \begin{bmatrix} H_{l,1}^1 & \dots & H_{l,1}^M \\ \dots & \dots & \dots \\ H_{l,N}^1 & \dots & H_{l,N}^M \end{bmatrix}^T \exp(-i2\pi l \Delta\theta).$$

На приемной стороне имеем сигнал:

$$\mathbf{r}(l) = \begin{bmatrix} H_{l,1}^1 & \dots & H_{l,1}^M \\ \dots & \dots & \dots \\ H_{l,N}^1 & \dots & H_{l,N}^M \end{bmatrix} \bar{s}_l + \bar{c}_l.$$

В ходе моделирования системы MIMO  $2 \times 2$  по методу STINGRAY получены характеристики пропускной способности канала

$$C = B \log_2(\mathbf{I} + \rho \mathbf{H} \mathbf{H}^+),$$

представленные на рис. 1. При моделировании в системе Matlab вводились следующие данные: кратность манипуляции  $m = 4$ ,

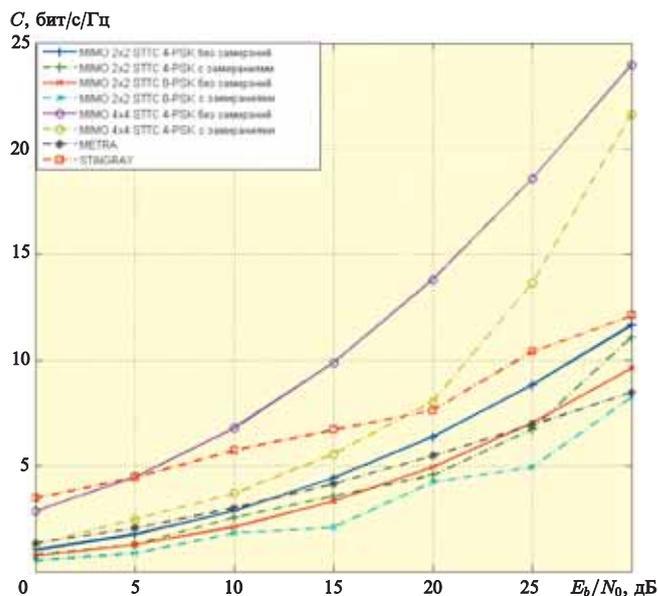


Рис. 1

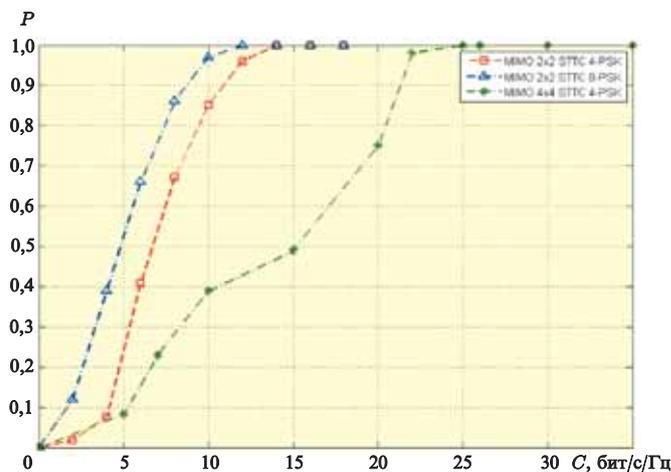


Рис. 2

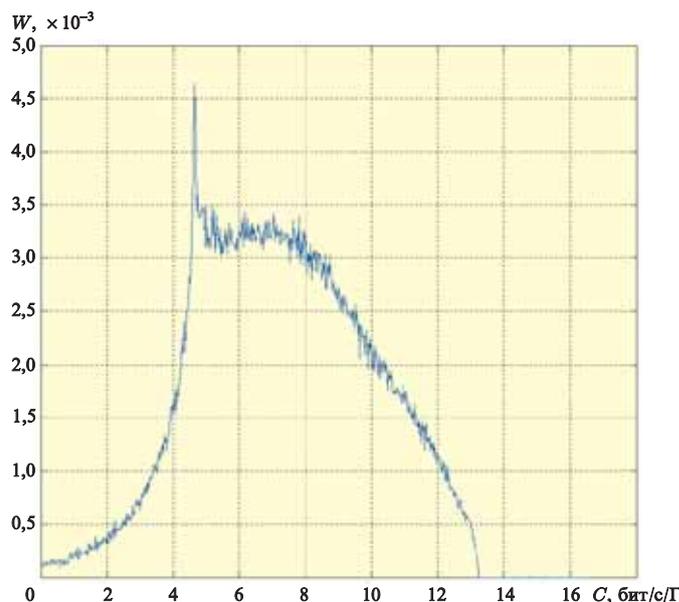


Рис. 3

число несущих OFDM  $G = 16$ , из них информационных  $F = 11$ , ОСШ = 30 дБ по мощности, ширина полосы частот  $B = 20$  МГц.

Итак, данная модель предназначена для анализа статистических характеристик широкополосных систем MIMO, поскольку позволяет учесть такие искажения, как неравномерный доплеровский сдвиг в полосе частот канала.

**Универсальная имитационная модель для ПО Matlab.** С учетом недостатков указанных выше методов моделирования была разработана имитационная модель системы OFDM-MIMO, обеспечивающая:

- учет параметров пространственно-временного кодирования и количества поднесущих выходного OFDM-сигнала;
- возможность переключения и изменения параметров канала (например, переключение между каналами с АБГШ и с релевскими замираниями);
- возможность первичной статистической обработки сигнала (получение значений вероятности битовых и символьных ошибок, оценка пропускной способности канала и ее распределения);
- гибкость и простота использования.

Было создано несколько моделей для систем MIMO  $2 \times 2$  и  $4 \times 4$  с модуляцией 4-PSK, 8-PSK и видами пространственно-временного кодирования STTC и блочного кода Аламоути. В ходе работы моделей были получены следующие характеристики каналов MIMO:

- помехоустойчивость, выраженная зависимостью  $P_b = f(E_b/N_0)$ ;
- усредненная по ансамблю реализаций пропускная способность канала  $C$  [бит/с];
- распределение и плотность распределения пропускной способности каналов в зависимости от  $E_b/N_0$ .

В первом приближении модель состоит из трех частей-имитаций: передающего тракта, канала распространения и приемного тракта. В передающем тракте осуществляется формирование сигнала и его математические преобразования, связанные с применяемым методом манипуляции и схемой пространственно-временного кодирования; в канале передачи – зашумление сигнала при заданном отношении  $E_b/N_0$ , искажения сигнала, определяемые характером и интенсивностью замирания. В приемном тракте, помимо демодуляции и декодирования сигналов, проводится первичная статистическая обработка данных о принятом сигнале. В его составе предусмотрен блок, производящий оценку пропускной способности канала, регистрацию ее мгновенных и усредненных по заданному числу реализаций значений.

#### Выбор метода пространственно-временного кодирования.

При реализации системы MIMO немаловажным является правильный выбор схемы пространственно-временного кодирования [6]. Здесь необходимо установить оптимальный баланс между требуемым ЭВК, относительной скоростью кодирования и сложностью реализации выбранной схемы. При выборе того или иного кода производится оценка ЭВК. Подробнее теоретическая оценка максимального ЭВК изложена в [7, 8]. В представленных моделях используются схемы STTC и блочного кода Аламоути, однако это не исключает возможности реализации иных схем кодирования.

Процесс кодирования по схеме Аламоути представляет собой перераспределение символов в соответствии с матрицей:

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_x^* & x_1^* \end{bmatrix}.$$

Таким образом, нетрудно убедиться, что передаваемая в двух трактах информация фактически дублируется в разные промежутки времени. Данная схема в силу своей простоты имеет очень широкое распространение, однако характеризуется невысоким ЭВК по сравнению с другими блочными кодами, каскадными кодами (в данном случае под каскадными кодами подразумевается тандем из блочного и решетчатого коди-

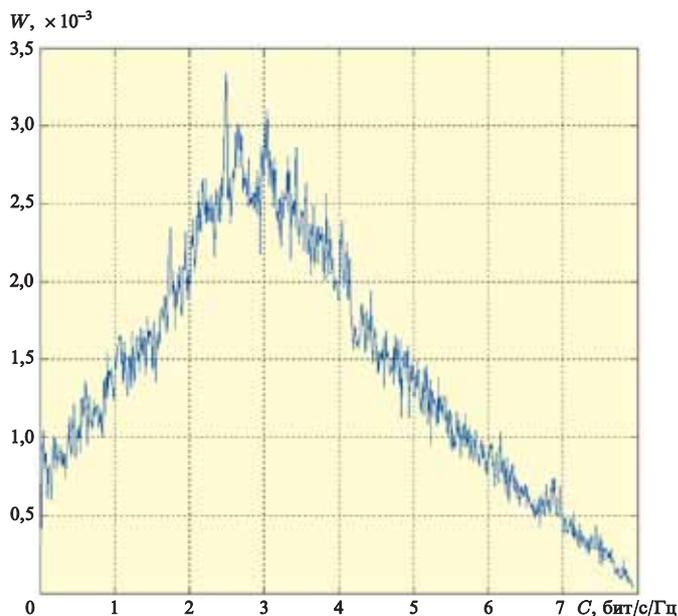


Рис. 4

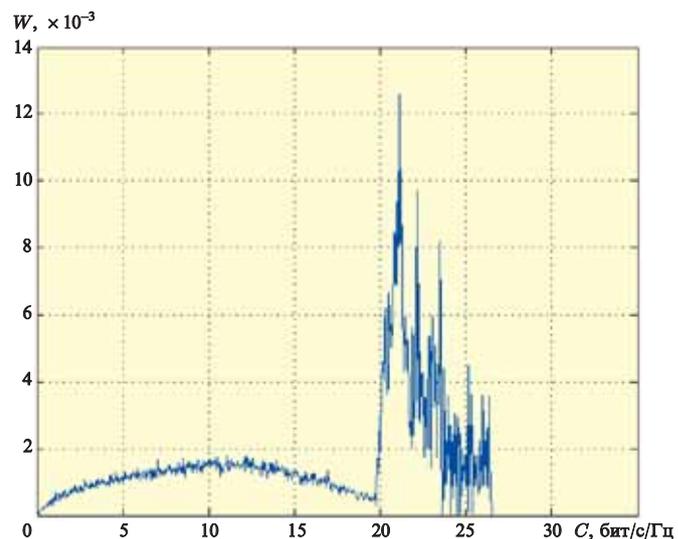


Рис. 5

рования) и кодами STTC.

В схеме кодирования STTC основными элементами являются решетчатый кодер Витерби и модулятор по схеме M-QAM или N-PSK. Разрядность кода  $v = M_{Viterbi} - M_{mod}$ , где  $M_{Viterbi}$  – число позиций кодирования,  $M_{mod}$  – кратность модуляции. Относительная скорость кодирования Витерби  $R_c = N/M_{Viterbi}$ .

Схемы кодирования STTC характеризуется относительно высоким ЭВК, который может быть дополнительно увеличен при использовании ее в составе каскадной схемы кодирования.

**Оценка пропускной способности канала.** Для оценки усредненной по времени пропускной способности канала используют следующие соотношения:

$$C_n = BL \log_2 \left( I_{max} + \left( \frac{E_b}{N_0} \right) M_{mod} \mathbf{H} \mathbf{H}^+ \right),$$

где  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \text{mean}(H_1) \\ \dots \\ \text{mean}(H_N) \end{bmatrix}$ ,  $L = \min(N, M)$ ,  $m$  – кратность моду-

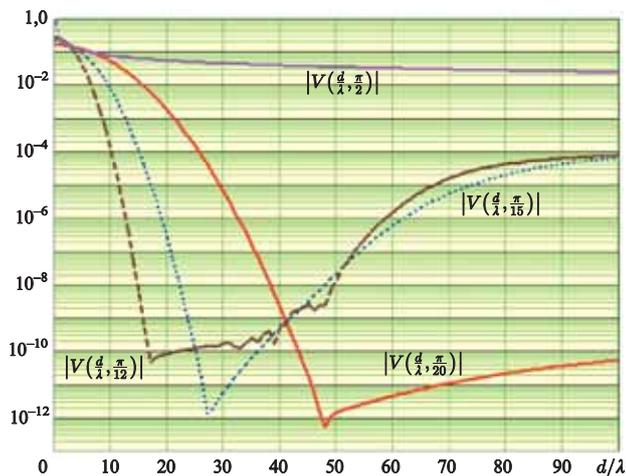


Рис. 6

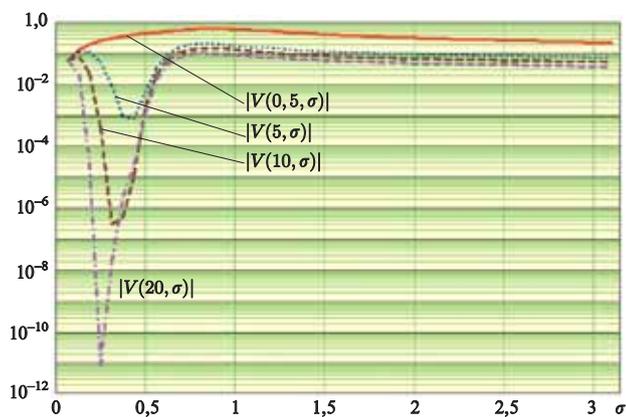


Рис. 7

ляции,  $mean(H_i)$  среднее значение по всем коэффициентам строки матрицы  $H_i$ .

Усредненная по времени относительная пропускная способность системы

$$\bar{C} = \sum_{j=1}^J C_j / J.$$

На рис. 1, 2 представлены графики распределения и плотности распределения (без учета полосы частот  $B$ ) пропускной способности систем различных конфигураций в условиях как простого канала с АБГШ, так и каналов с релеевскими замираниями и пространственной корреляцией. На рис. 3–5  $W(C)$  - распределение вероятностей скоростей передачи данных системы.

По графикам на рис. 3–5 нетрудно заметить следующие закономерности:

- перемещение моды распределения по горизонтальной оси с ростом числа приемных и передающих трактов. Таким образом, повышается вероятность реализации более высоких пропускных способностей канала с увеличением числа антенных трактов в системе.

- снижение СКО относительной пропускной способности системы с ростом числа приемных и передающих трактов, а также со снижением числа позиций модуляции.

Все представленные на графике результаты были получены при  $E_b/N_0 = 15$  дБ.

**Учет влияния пространственной корреляции сигналов.** Мате-

Таблица

Вариант модели	Выигрыш пропускной способности канала, %	
	64 кбит/с	144 кбит/с
SISO (1 × 1, базовая)	100	100
SIMO (2 × 1) с пространственно-временным разделением потоков (STTD)	147	142
Системы с Rake-приемниками (1 × 2)	270	273
SISO (1 × 1 с декодированием по наименьшей среднеквадратической ошибке)	122	120
MISO (1 × 2 с декодированием по наименьшей среднеквадратической ошибке)	353	351
MIMO 2 × 2	351	350

матическая база, предназначенная для имитации пространственной корреляции сигналов антенн, приведена в [9]. В данной статье ограничимся лишь выбором параметров представленной модели.

Таким образом, для упрощения распределение углов прихода лучей на приемной стороне и углов излучения на передающей выражено одной общей моделью, в основе которой лежит распределение Гаусса. Среди прочих параметров модели следует указать: число приемных и передающих антенн (размер корреляционной матрицы  $\mathbf{P}$ ); нормированное расстояние между антеннами  $d/\lambda$ .

Корреляционные матрицы на приеме и передаче выглядят следующим образом:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \nu_{1,1} & \dots & \nu_{1,M} \\ \dots & \dots & \dots \\ \nu_{M,1} & \dots & \nu_{M,M} \end{bmatrix},$$

где  $\nu(\frac{d}{\lambda}) = \int e^{-i2\pi\frac{d}{\lambda}\sin(\theta)} N(\frac{\theta}{\sigma}, \mu, \sigma) d\theta$ ,  $\nu_{n,m} = \nu(|n - m| \frac{d}{\lambda})$ .

В рамках представляемой модели задача минимизации пространственной корреляции сводится к минимизации таковой для соседних антенн. Как видно из рис. 6 и 7, решение задачи может быть упрощено путем определения оптимальных  $d/\lambda$  и  $\sigma$ , при которых уровень пространственной корреляции не превышает заданных пределов. Таким образом, заранее получив оценку пространственной взаимной корреляции сигналов, можно определить требования к конфигурации антенного тракта, т.е. к выбору антенных элементов и вариантов их расположения относительно друг друга.

**Закключение.** Предложенная имитационная модель системы OFDM-MIMO различных конфигураций отличается гибкостью и большим количеством учитываемых параметров среды распространения. Она может быть использована для оценки пропускной способности канала в различных условиях функционирования системы, а также помехоустойчивости систем разных конфигураций с различными схемами пространственно-временного и помехоустойчивого кодирования. Данная модель универсальна, поскольку позволяет анализировать характеристики как узкополосных, так и широкополосных систем MIMO.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М. Новые технологии в системах мобильной радиосвязи. – М.: Инсвязьиздат, 2005.
2. Yu K. Modeling of Multiple-Input Multiple-Output Radio Propagation Channels Signal Processing Department of Signals, Sensors and Systems. – Royal Institute of Technology. 2002.
3. Гармонов А.В., Савинков А.Ю., Филин С.А. и др. Современные европейские исследовательские проекты в области беспроводной связи. [http://www.rasu.ru/new\\_site/news.php?id=768](http://www.rasu.ru/new_site/news.php?id=768). 2006.
4. Skentos N.D., Kanatas A.G. etc. MIMO Channel modeling for FWA communication systems. – National Technical University of Athens. 2002.
5. Eggers P.C.F., Toftgard J., Oprea A.M. Antenna systems for base station diversity in urban small and micro cells - IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2003. – 11.

6. **Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П.** Повышение скорости передачи информации и спектральной эффективности беспроводных систем связи// Цифровая обработка сигналов. – 2006. – № 1.
7. **Chen Z., Yuan J., Vucetic B.** Improved space-time coded modulation scheme on slow Rayleigh fading channels// Electronics Letters. – 2001. – V. 37. – № 7.
8. **Gaspa R., Fonollosa J.R.** Space-Time Coding for UMTS. Performance Evaluation in Combination with Convolutional and Turbo Coding. – Universitat Politecnica de Catalunya. 2000.
9. **Тираспольский С.А., Шашин О.С.** Влияние пространственной корреляции сигналов на статистические характеристики пропускной способности ММО систем связи/ Труды научной конференции по радиофизике ННГУ. – 2005.

*Получено 5.12.07*