

ИМИТАЦИОННАЯ ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ТЕХНОЛОГИЕЙ МІМО И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОМ КОДИРОВАНИЕМ

В последние годы большое распространение получили телекоммуникационные системы с пространственно-временным кодированием. В таких системах передаваемые сигналы разделяются в пространстве и во времени, что позволяет уменьшить вероятность битовых ошибок. Пространственное кодирование подразумевает наличие двух или более передающих антенн и одну (в случае MISO) или несколько (в случае MIMO) приемных антенн. Рабочие характеристики таких систем зависят от правильной оценки состояния многолучевого канала, определяемого как отклик на посылку тестовых (пилотных) сигналов, а также от методов кодирования сигнала на передаче и его декодирования и обработки на приемной стороне.

Наблюдается рост числа мобильных абонентов в телекоммуникационных сетях. Однако характеристики телекоммуникационных систем с технологией MIMO и пространственно-временным кодированием для мобильных терминалов изучены недостаточно [1 – 3]. Кроме того, следует отметить, что для исследования MIMO систем с различными методами пространственно-временного кодирования необходимо дорогостоящее оборудование и создание различных вариантов окружающей обстановки, которые не всегда доступны для экспериментатора в реальных условиях. Поэтому разработка имитационной модели, которая моделирует канал, учитывает способы формирования и обработки сигналов в условиях мобильности абонентов является актуальной задачей.

На основе известных принципов работы цифровых беспроводных телекоммуникационных систем с технологией MIMO и пространственно-временным кодированием [1 – 3] была разработана схема имитационной модели такой системы (рис. 1).

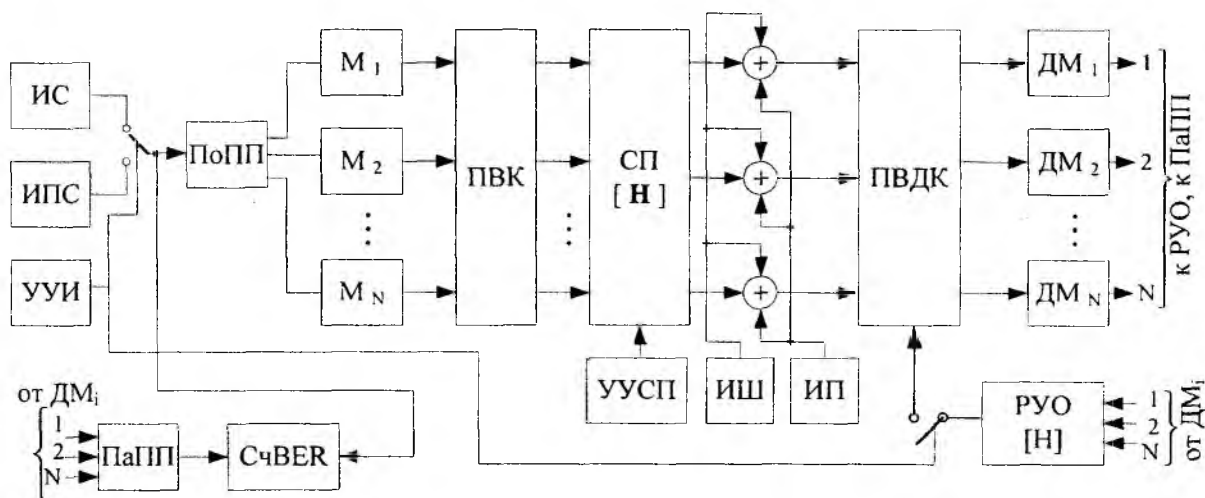


Рис. 1

Устройство управления передаваемой информацией УИИ через регулируемое число битовых интервалов поочередно подключает источник сообщения ИС и источник пилотных сигналов ИПС к преобразователю последовательного потока бит в параллельный ПоПП и одновременно к счетчику битовых ошибок СчBER. N последовательных потоков импульсов подаются на N модуляторов M_i , с выхода которых сигналы поступают на пространственно-временной кодер ПВК, а затем – в среду передачи СП многолучевого канала с передаточной характеристикой, описываемой матрицей H . В случае движения абонента матрица H изменяется. Воздействие шумов и помех моделируется соответствующим источником шума ИШ

и помех ИП. После прохождения среды передачи сигналы с шумами и помехами со всех каналов поступают на пространственно-временной декодер ПВДК и далее через демодуляторы ДМ_i на обратный преобразователь параллельных потоков в последовательный поток бит ПаПП. Сигналы с выхода ПаПП приемника поступают одновременно с сигналами со входа ПоПП передатчика на счетчик битовых ошибок Сч BER. Элементы матрицы **H** периодически оцениваются решающим устройством оценки по пилотному сигналу РУО и записываются в ПВДК.

Имитационная модель (рис. 1) реализована программно. Модуляторы М_i, пространственно-временной кодер ПВК и соответствующие им по технологиям обработки демодуляторы ДМ_i и декодер ПВДК выполнены в виде отдельных программных модулей. Это позволяет изучать поведение ММО систем с пространственно-временным кодированием для различных видов пространственно-временных кодов и модуляции. Отдельными программными модулями также реализованы различные варианты среды передачи СП.

Одной из самых распространенных схем пространственно-временного кодирования является схема Аламути (рис. 2). Использование этой схемы предусмотрено в WiMax системах по стандарту IEEE 802.16.

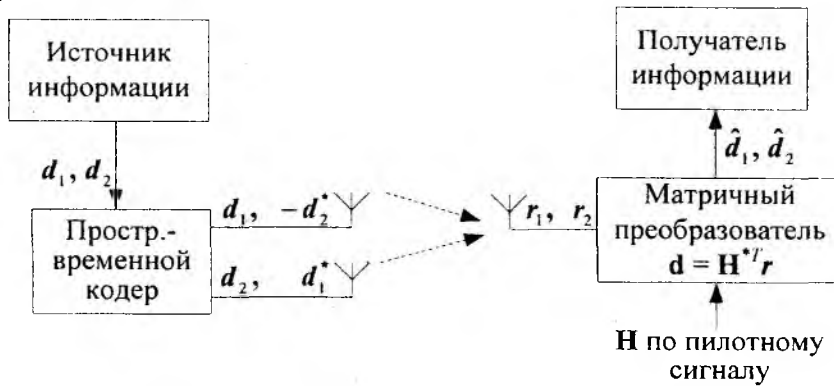


Рис. 2

Принцип пространственно-временного кодирования по Аламути заключается в том, что последовательность передающихся модуляционных символов разделяется на пары (нечетный – четный) d_{2i-1} и d_{2i} . Их передача осуществляется за два интервала. В первом интервале передачи первая антенна излучает сигнал символа d_{2i-1} , а вторая антенна – сигнал d_{2i} . Во втором интервале передачи первая и вторая антенны излучают соответственно сигнал $-d_{2i}^*$ и сигнал d_{2i-1}^* , где * – означает комплексное сопряжение.

Сигналы, которые поступят на вход приемника в первый и второй символьные интервалы, определяются выражениями

$$\begin{aligned} r_1 &= h_1 d_1 + h_2 d_2, \\ r_2 &= -h_1 d_2^* + h_2 d_1^*, \end{aligned} \quad (1)$$

где h_1 и h_2 – комплексные коэффициенты передачи канала, представляющие собой отношение комплексной амплитуды напряжения на выходе приемной антенны к комплексной амплитуде сигнала на входе первой и второй передающих антенн.

Выражение (1) можно записать в матричной форме

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \mathbf{d}, \quad (2)$$

где **H** – матрица, состоящая из комплексных коэффициентов передачи канала, а также из величин, отличающихся от них комплексным сопряжением и знаком.

Для получения вектора переданных данных следует выполнить преобразование

$$\mathbf{d} = \mathbf{H}^{*T} \mathbf{r}. \quad (3)$$

Решение этого уравнения возможно, если известны коэффициенты h_1 и h_2 . Для их нахождения передатчик транслирует заранее известные пилотные сигналы z_i и z_{i+1} . В приемнике решается система уравнений

$$\begin{cases} \hat{h}_1 = \frac{r_i z_i^* - r_{i+1} z_{i+1}}{z_i^2 + z_{i+1}^2}, \\ \hat{h}_2 = \frac{r_{i+1} z_i + r_i z_{i+1}^*}{z_i^2 + z_{i+1}^2}, \end{cases} \quad (4)$$

где \hat{h}_1, \hat{h}_2 – величины оценки h_1 и h_2 по пилотному сигналу.

Схема имитационной модели телекоммуникационной системы с пространственно-временным кодированием Аламоути приведена на рис. 3.

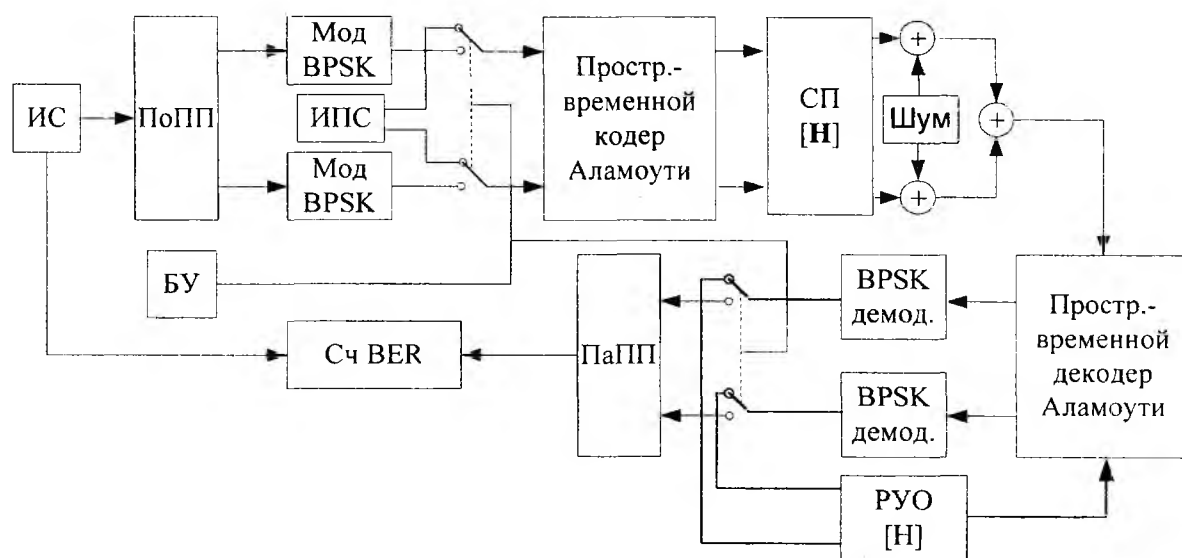


Рис. 3

Источник сообщения (ИС) в модели генерирует случайные битовые последовательности, которые имитируют передачу данных. Затем эти последовательности побитно поступают на блок последовательно-параллельного преобразования (ПоПП), разделяющий входной поток битов на два параллельных потока. Каждый из этих параллельных потоков поступает на вход BPSK модулятора, формирующего модуляционные символы. Перед началом передачи каждой группы из N бит полезной информации передаются пилотные сигналы, модулированные BPSK. После того как сигналы кодируются по методу Аламоути, описанному выше, они поступают в блок СП. Многолучевый радиоканал в данной модели рассматривается как КИХ-фильтр с заданными параметрами, изменяемыми во времени [4]. К сигналу на выходе таких фильтров добавляется белый гауссовский шум. На приемной антенне происходит суммирование сигналов, которое на схеме представлено сумматором.

На приемной стороне полученная сумма сигналов декодируется пространственно-временным декодером Аламоути по формуле (3) и поступает на BPSK-демодуляторы. Далее, два параллельных битовых потока объединяются в один, восстанавливая исходную битовую последовательность. Для анализа битовых ошибок биты с блока ИС и выхода схемы поступают на блок счетчика BER, где происходит сравнение исходного и принятого потоков бит. Для работы ПВДК используются величины оценки \hat{h}_1 и \hat{h}_2 матрицы \mathbf{H} , которые периодически подаются в ПВДК от решающего устройства оценки по пилотному сигналу, через заданное число битовых интервалов.

Для программной реализации предложенной схемы использована среда Matlab, в которой имеются функции многолучевых релейских и райсовских каналов с заданными параметрами, представляемыми в виде КИХ-фильтров.

Вначале в программе задаются параметры моделирования: скорость мобильного абонента, размер группы бит полезной информации, частота несущей, скорость передачи данных, метод модуляции и тип радиоканала. После этого происходит программная инициализация объектов с заданными параметрами – многолучевого канала, модуляторов и демодуляторов. Когда инициализация завершена, в цикле последовательно выполняются все ключевые этапы работы системы связи – формирование данных, модуляция, пространственно-временное кодирование, прохождение через радиоканал. В конце цикла подсчитывается значение BER по формуле $BER = N_{er} / N_{tot}$, где N_{er} – количество ошибочно принятых бит, N_{tot} – общее количество переданных бит.

С помощью описанной программной имитационной модели были проведены исследования зависимости BER от отношения энергии сигнала на один бит к плотности мощности шума на единицу полосы частот E_b/N_0 , при различных скоростях движения терминала абонента. Для E_b/N_0 от 0 до 15 дБ результаты моделирования приведены на рис. 4, а для E_b/N_0 от 20 до 30 дБ – на рис. 5.

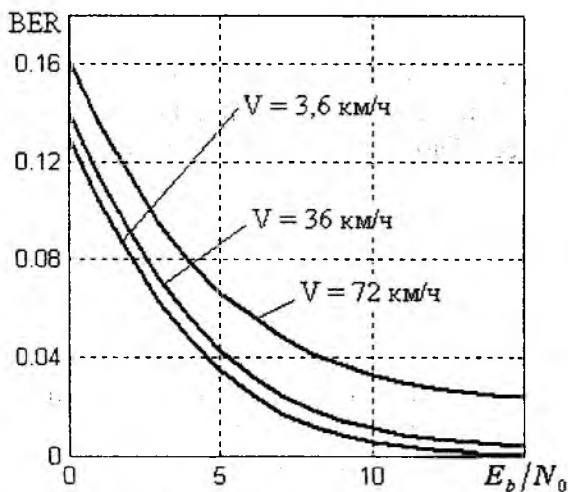


Рис. 4

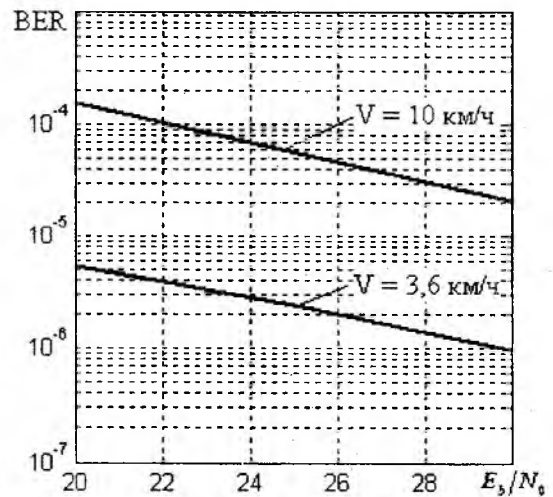


Рис. 5

Из анализа зависимостей $BER(E_b/N_0)$ (рис. 4) следует, что при малых значениях отношения E_b/N_0 величина ошибок BER очень велика и только при значениях E_b/N_0 свыше 15 дБ уменьшается до $2,35 \cdot 10^{-4}$ для скорости 3,6 км/час. При дальнейшем росте E_b/N_0 до 30 дБ можно получить уровень ошибок почти 10^{-6} (рис. 5).

На рис. 6 представлена зависимость вероятностей битовых ошибок BER от скорости движения терминала абонента.

Уровень битовых ошибок зависит от скорости движения абонента. При малых скоростях в единицы километров в час это влияние слабо выражено. Быстрый рост ошибок наблюдается при больших скоростях движения абонента. Так, при увеличении скорости с 36 до 72 км/час уровень ошибок при $E_b/N_0 = 20$ дБ возрастает в 9,9 раз.

Имитационное моделирование выполнялось на компьютере с двухядерным процессором Intel с частотой ядра 2 ГГц и ОЗУ 2 Гб. Значения BER определялись путем усреднения 20 испытаний по нахождению 10^3 ошибок. При малых отношениях E_b/N_0 до 10 дБ и высоких скоростях движения абонента до 72 км/ч время на определение одного значения BER не

превышало 1 мин. Увеличение отношения E_b/N_0 до 20 дБ при скорости движения абонент в сети 15 км/ч привело к увеличению времени моделирования до 32 мин.

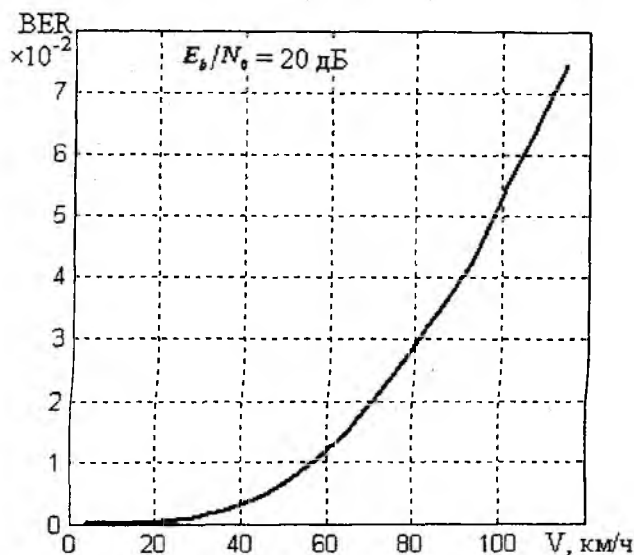


Рис. 6

Увеличение времени на определение BER объясняется тем, что в программной модели, в отличие от реальной телекоммуникационной системы, вычислительные ресурсы компьютера тратятся на программную имитацию работы всех блоков телекоммуникационной модели. Второй причиной являются особенности программного обеспечения Matlab. Его универсальность достигнута за счет усложнения программ и соответствующего увеличения требований к вычислительным ресурсам компьютеров.

Выводы

1. Разработана имитационная программная модель телекоммуникационной системы с технологией MIMO и пространственно-временным кодированием, включающая сменные программные модули сред передачи, модуляторы, демодуляторы, пространственно-временные кодеры и декодеры. Модель позволяет имитировать процесс передачи информации и пилотных сигналов в телекоммуникационных системах MIMO с различным числом приемных и передающих антенн, в том числе систем MISO и систем без пространственно-временного кодирования SIMO и SISO, а также исследовать зависимости уровня битовых ошибок BER от скорости движения абонента в сети, отношения сигнал/шум, частоты несущей, скорости передачи информации, типа модели среды передачи, вида модуляции и кодирования, влияния временно-го интервала между посылками пилотных сигналов.

2. Результаты моделирования телекоммуникационной системы MISO с пространственно-временным кодированием по Аламоути подтвердили сильную зависимость уровня битовых ошибок BER от отношения E_b/N_0 . При увеличении E_b/N_0 до 20 дБ и выше уровень BER становится менее 10^{-5} .

Для мобильных абонентов, движущихся с малой скоростью до 6 км/ч, увеличение BER за счет мобильности абонентов незначительно, и для оценки поведения телекоммуникационной системы можно использовать данные для терминалов сетей со стационарными абонентами.

Для мобильных абонентов, движущихся с большими скоростями, пренебрегать влиянием мобильности абонентов на уровень BER даже при высоких E_b/N_0 нельзя, так при изменении скорости от 3,6 до 72 км/ч уровень BER возрастает с $5,37 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-2}$ ($E_b/N_0 = 20$ дБ). При больших скоростях движения абонента в телекоммуникационной системе целесообразно при-

менить кроме пространственно-временного кодирования Аламоути дополнительные меры по уменьшению BER.

Список литературы: 1. *Сюваткин В.С.* и др. WiMAX технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение / Под ред. В.В. Крылова. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 2. *Вишневский В. М., Лятов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В.* Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005. 3. *Alamouti S. M.* A Simple Transmit Diversity for Wireless Communications // IEEE Journal on Select Areas in Communications. Oct. 1998. Vol. 16. №8. P. 1451-1458. 4. *Jeruchim, M. S., Salaban, P., and Shanmugan, K. S.,* Simulation of Communication Systems, Second Edition. New York: Cluwer Academic/Plenum, 2000.

*Зарьковский национальный
университет радиозлектроники*

Поступила в редколлегию 11.11.2008