

**ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ ЗАЩИЩЕННОСТИ СИСТЕМЫ MIMO  
НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОЙ МОДЕЛИ ОТВОДНОГО КАНАЛА.  
ЧАСТЬ II: РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Введение**

Статья является продолжением [1] и дополняет ее результатами моделирования каналов MIMO при наличии кластеров, представляющих собой группы отражающих объектов и создающих в канале сигнал в виде группы лучей. Каждый луч, проходящий в приемную антенну, имеет свое затухание и задержку. Такой режим работы MIMO системы характерен для закрытых помещений при наличии множества отражающих поверхностей [2].

**Цель работы** – верификация предложенной в [1] модели и исследование с ее помощью характеристик защищенности.

**Описание модели**

Численные исследования проведены на основании схемы, представленной на рис. 1, основанной на схеме, приведенной в [1] и дополненной некоторыми вспомогательными блоками.

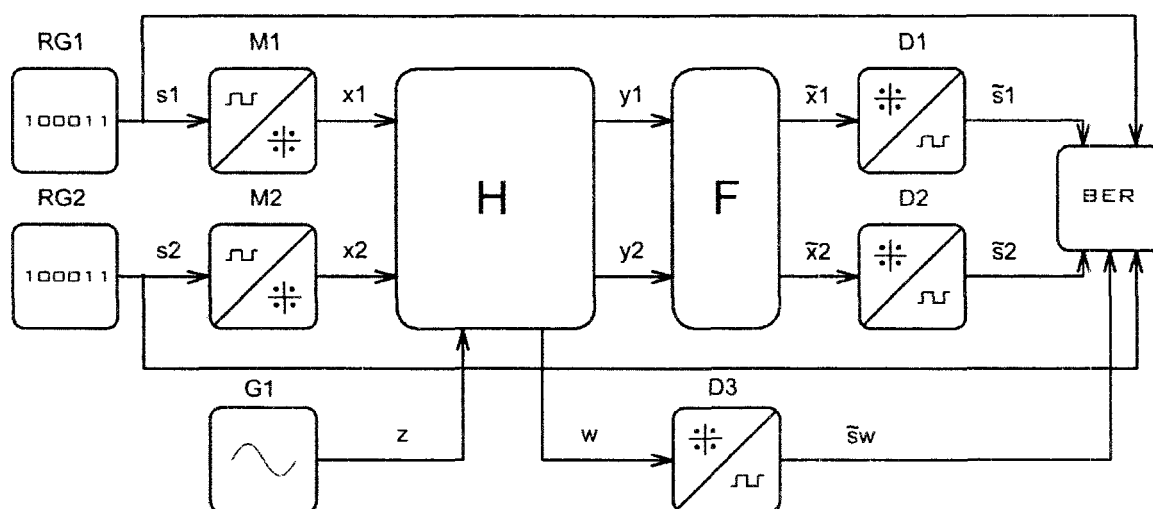


Рис. 1

Для получения характеристик защищенности канала MIMO в модель включены следующие основные элементы: передатчик, среда распространения, легитимный приемник, приемник отводного канала и постановщик помех. Предположим, что постановщик помех и нелегитимный приемник находятся в одном месте. Обозначим два канала передачи данных. Первым является основной канал, состоящий из модуляторов M1 и M2, среды распространения H, блока обработки F, и демодуляторов D1, D2. Качество системы связи описывается достоверностью принятых данных BER при заданном отношении сигнал/шум SNR в основном канале. Легитимный канал описывается уравнением

$$\begin{pmatrix} y1 \\ y2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h11 & h12 \\ h21 & h22 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x1 \\ x2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n \\ n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $y1, y2$  – сигнал на входе приемника основного канала;  $h22, h21, h12, h11$  – элементы матрицы H;  $x1, x2$  – модулированные входные сигналы;  $n$  – белый гауссовский шум.

Для исследования влияния помех в модель канала включен постановщик помех G1. В этом случае качество передачи информации в легитимном канале связи определяется отношением сигнал-помеха SIR, а канал описывается уравнением (2).

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_{z1} \\ h_{z2} \end{pmatrix} \cdot z + \begin{pmatrix} n \\ n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $z$  – помеха;  $h_{z1}$ ,  $h_{z2}$  – элементы матрицы  $H_z$ .

Отводной канал (ОК) представлен модуляторами  $M_1$ ,  $M_2$ , средой распространения  $H$  и демодулятором  $D_3$ , и описывается уравнением (3). Скрытность основного канала связи можно оценить по уровню достоверности BER информации, принятой нелегитимным приемником в ОК:

$$w = (h_{w1} \quad h_{w2}) \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n \\ n \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $w$  – сигнал на входе приемника отводного канала;  $h_{w1}$ ,  $h_{w2}$  – элементы матрицы  $H_w$ .

В качестве источника информации используются два независимых генератора случайных чисел  $RG_1$  и  $RG_2$ . Входная последовательность, генерируемая этими блоками,  $s_1$  и  $s_2$  поступает на  $BPSK$  модуляторы  $M_1$  и  $M_2$ . После чего модулированные сигналы  $x_1$  и  $x_2$  поступают на вход блока имитации стационарного канала распространения,  $H$ . Также в блок  $H$  поступает помеха  $z$  от генератора  $G_1$ . Выходные последовательности  $y_1$ ,  $y_2$  эквивалентны напряжениям на антеннах легитимного приемника. Блок  $F$  решает систему линейных уравнений (1), разделяя пространственные каналы. Далее сигналы поступают на демодуляторы  $BPSK D_1$ ,  $D_2$ , после чего полученная в приемнике информация  $\tilde{s}_1$ ,  $\tilde{s}_2$  сверяется с переданной  $s_1$ ,  $s_2$  в блоке  $BER$ , где вычисляется количество ошибок.

Схема блока  $H$  представлена на рис. 2, а. Фильтры, имитирующие среду распространения, являются элементами этого блока. Они имеют импульсные характеристики, полученные при помощи программы [3] для канала типа  $B$  (характерного для небольших закрытых помещений), при расстоянии между приемными антеннами  $0,5\lambda$  и между передающими антеннами –  $1\lambda$ .

Модуль импульсной характеристики первого фильтра  $h_{11}$  для данных условий представлен на рис. 2, б. Как видно из рисунка, на приемную антенну приходят девять лучей с различными амплитудами. Предположив, что длительность импульса равна длительности импульсной характеристики, получим сигнал без шума, прошедший такой канал распространения, рис. 2, в. На рис. 2, в серой линией обозначен входной сигнал  $x(n \cdot t)$ , черной линией показан сигнал на выходе блока  $y(n \cdot t)$ , что эквивалентно сигналу на приемной антенне в канале без шума с импульсной характеристикой  $h_{11}(n \cdot t)$ , где  $t$  – период выборки.

Вычисление обратной матрицы  $F$  выполняется по следующему алгоритму:

- составляется матрица канала для каждого луча  $i$  –  $H_i$ ;
- для каждой матрицы вычисляется определитель –  $\det H_i$ ;
- если определитель  $\det H_i$  больше порогового значения (было взято  $3 \cdot 10^{-4}$ ), то матрица  $F_i$  для данного луча определяется по формуле

$$F_i = \frac{1}{\det H_i} \begin{pmatrix} h_{22_i} & -h_{12_i} \\ -h_{21_i} & h_{11_i} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $h_{22_i}$ ,  $h_{21_i}$ ,  $h_{12_i}$ ,  $h_{11_i}$  – элементы матрицы  $H_i$ ;

- если определитель меньше порогового значения, то применяется формула

$$F_i = 0,6F_{i-1}, \quad (5)$$

- из элементов матриц  $F_i$  составляется  $F$ .

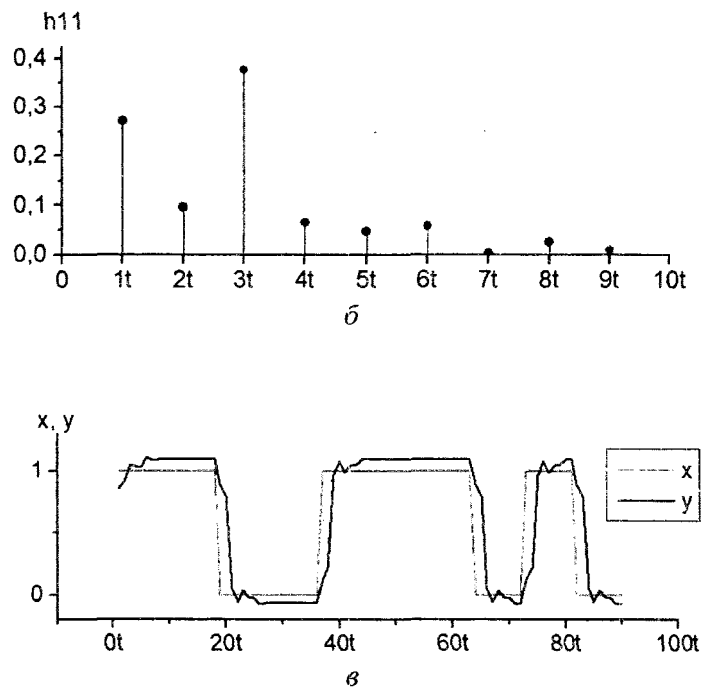
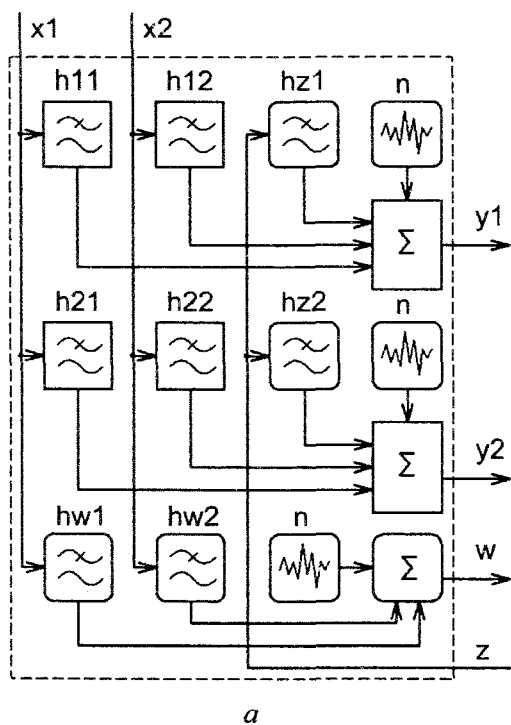


Рис. 2

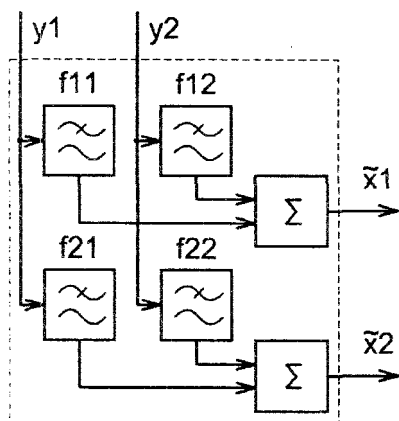


Рис. 3

Импульсные характеристики фильтров  $f_{11}, f_{12}, f_{21}, f_{22}$  (рис. 3) являются элементами матрицы  $F$ .

Примененный подход позволяет легко моделировать системы передачи информации с технологиями *MIMO* во временной области. Также модель может быть модифицирована. Одной из возможных модификаций является внедрение фильтров, согласованных с сигналом.

Еще одним достоинством является то, что в качестве помехи может быть задан сигнал любой формы.

### Результаты моделирования

Для верификации модели в среде Matlab проведен ряд численных экспериментов, результаты которых сравнены с теоретическими данными. На рис. 4 приведена зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для различных моделей. Серым пунктиром обозначена характеристика канала *MIMO* 2x2 с пространственно-временным кодированием Аламоути [4]. Черным пунктиром обозначена характеристика, описываемая Гауссовым интегралом ошибки для *BPSK* и являющаяся теоретическим пределом для данного вида модуляции. Сплошной черной линией обозначена зависимость качества связи в основном канале, полученная в результате моделирования *MIMO* канала с описанными выше условиями. Вероятность битовой ошибки *BER* вычислялась по формуле

$$BER = \frac{err1 + err2}{2 \cdot bits\_total} \quad (6)$$

где  $err1$  – количество неправильно принятых бит в первом канале;  $err2$  – количество неправильно принятых бит во втором канале;  $bits\_total$  – количество бит, переданное по одному каналу за время моделирования.

Для реализации кодирования Аламути в модели канала *MIMO* (рис. 1) были сделаны следующие изменения: источники *RG1* и *RG2* объединены в один для формирования блочно-го кода; блок обработки *F* заменен декодером Аламути; канал описывался импульсной характеристикой состоящей из одного отсчета. Также при моделировании не учитывалось влияние постановщика помех.

Уровни ошибок в отводном канале для каждого источника информации незначительно различаются. На графике сплошной серой линией представлена кривая вероятности ошибки принятия сигнала  $s_2$ , поскольку в данном случае она минимальна.

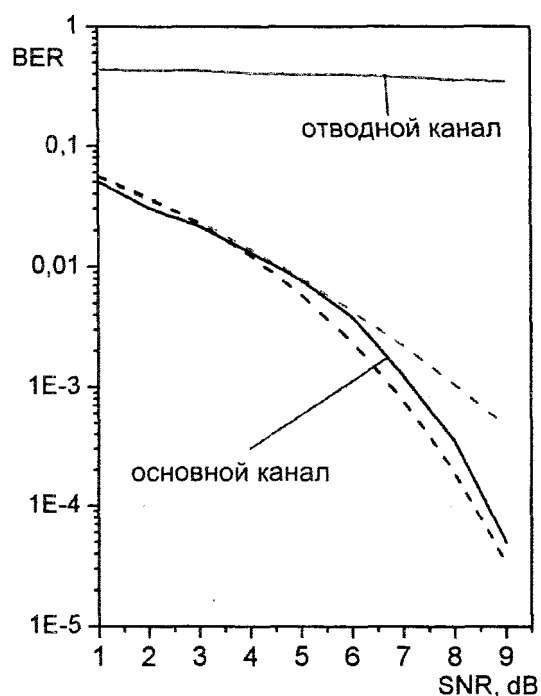


Рис. 4

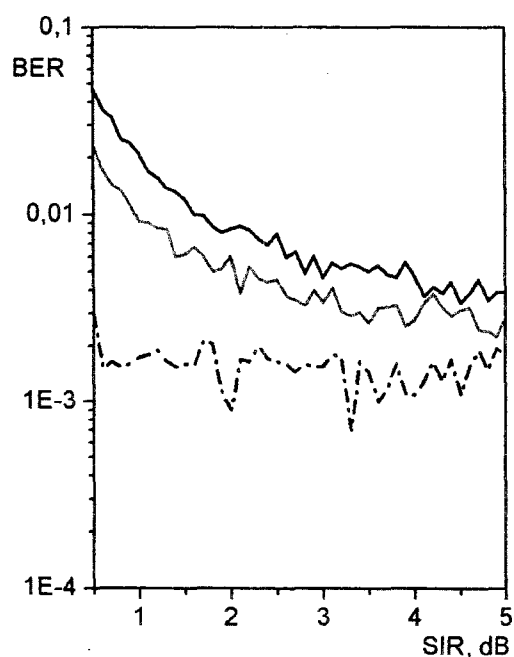


Рис. 5

Полученный результат показывает, что производительность системы *MIMO*, которая учитывает более точно характеристики среды распространения и наличие в ней отражающих объектов, выше, чем для кодирования Аламути с узкополосным приближением. Также видно, что качество связи для такой системы близко к теоретическому пределу определенным Гауссовым интегралом ошибки [5].

На рис. 5 приведена зависимость вероятности битовой ошибки *BER* от отношения сигнал-помеха *SIR*. Помехой в данном случае выступает синусоидальный сигнал вблизи несущей частоты. Черной сплошной линией обозначена помехоустойчивость канала при одночастотной помехе на частоте  $\Omega = 0,05$ , серым – для  $\Omega = 0,1$ , пунктиром –  $\Omega = 0,2$ . Зависимости приведены для отношения сигнал-шум  $SNR = 7$ .

$$\Omega = t(f_i - f_0), \quad (7)$$

где  $\Omega$  – нормированная разностная частота;  $f_i$  – частота помехи;  $f_0$  – несущая частота,  $t$  – период выборки.

Зависимость вероятности битовой ошибки в основном канале связи от частоты одночастотной помехи для различных значений отношения сигнал/помеха *SIR* при  $SNR = 7$  приведена на рис. 6. Черной сплошной линией обозначена помехоустойчивость канала для  $SIR = 1$ , черной пунктирной линией для  $SIR = 3$ , серой линией –  $SIR = 7$ .

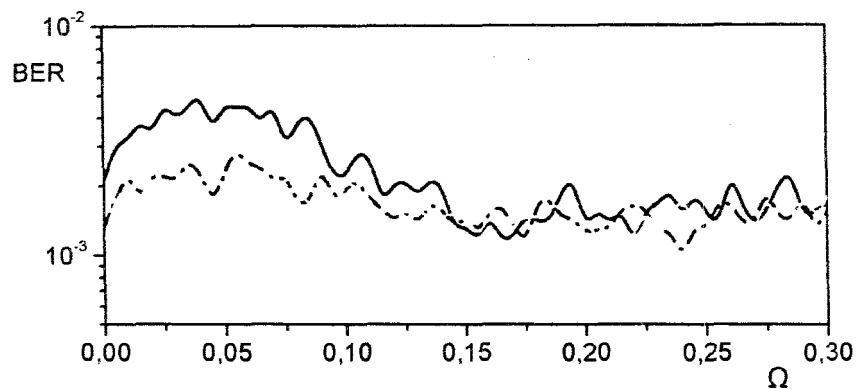


Рис. 6

Нормированная ширина спектра передаваемого сигнала составляет  $\Delta\Omega = 0,22$ , а верхняя его граница – 0,11. Как видно из рисунка, сигналы, лежащие вне спектра передаваемого сигнала, практически не влияют на качество MIMO канала связи.

Полученные результаты оценки защищенности MIMO канала на физическом уровне являются новыми, по сравнению с данными других авторов [6, 7], базирующихся в основном на информационных характеристиках канала.

### Заключение

Разработана имитационная модель системы MIMO с отводным каналом при наличии отражающих объектов в среде распространения и получены характеристики защищенности канала с учетом физического уровня передачи сигналов. Результатами моделирования являются временные характеристики канала связи.

В дальнейшем планируется подтверждение результатов моделирования экспериментальными данными, а также усовершенствование модели для перехода от временных характеристик к геометрическим.

**Список литературы:** 1. Кузнецов А.А. Цопа А.И. Приближенный анализ защищенности системы MIMO на основе кластерной модели отводного канала. Ч. I. Модель // Радиотехника : Всеукр. міжвед. науч.-техн. сб. – 2011. – Вып. № 164. 2. Erceg V. Indoor MIMO WLAN Channel Models // IEEE 802.11-03/940r4. – 2004. 3. Schumacher L. WLAN MIMO Channel Matlab program. [http://www.info.fundp.ac.be/~lsc/Research/IEEE\\_80211\\_HTSG\\_CMSC/distribution\\_terms.html](http://www.info.fundp.ac.be/~lsc/Research/IEEE_80211_HTSG_CMSC/distribution_terms.html). 4. Alamouti S.M. A simple transmit diversity technique for wireless communications // IEEE J. Select. Areas Comm. – 1998. – Т. № 16 (8) – P. 1451–1458. 5. Proakis J. G. Digital Communications. 4th ed. – McGraw-Hill, 2001. – P. 271-272. 6. X. Li and E. P. Ratazzi, MIMO transmissions with information-theoretic secrecy for secret-key agreement in wireless networks // IEEE Military Communications Conference (MILCOM'2005), Atlantic City, NJ. – 2005. 7. Oggier Fr., Hassibi B. The secrecy capacity of the MIMO wiretap channel // IEEE international symposium on information theory. – Toronto, Ontario, Canada, 2008. – P. 524-528.

Харьковский национальный  
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 17.02.2011