

## ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ ЗАЩИЩЕННОСТИ СИСТЕМЫ МІМО НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОЙ МОДЕЛИ ОТВОДНОГО КАНАЛА. ЧАСТЬ I: МОДЕЛЬ

### Введение

Создание мультимедийных ведомственных систем связи (ВСС) требует решения задачи не только повышения производительности цифровых систем передачи информации (ЦСПИ), но и их защищенности. При этом одновременно должны быть решены как задачи, связанные с конфиденциальностью передачи информации, т.е. скрытностью системы связи, так и задачи, связанные с повышением помехозащищенности системы связи, т.е. обеспечение функционирования ВСС при действии преднамеренных помех [1].

Угрозы информационной безопасности в беспроводном сегменте ВСС (уровня LAN), связаны с появлением при передаче информации отводных каналов (каналов утечки), с помощью которых нарушитель может пассивно или активно воздействовать на ВСС. Использование возможностей физического уровня каналов связи и появление МІМО-технологий указывают на новые пути повышения защищенности ВСС [2, 3].

Следует отметить, что моделирование отводных каналов, возникающих при передаче информации в ВСС, является по существу единственным методом достаточно полного исследования их параметров и возможностей с целью последующей разработки способов и средств защиты информации. Физическое моделирование отводных каналов затруднено, а иногда просто невозможно по нескольким основным причинам:

- приемник-обнаружитель является техническим средством нарушителя, а значит его пространственное расположение и параметры (тип приемника, чувствительность, метод обработки и т.п.) неизвестны;
- возможности и параметры постановщика помех нарушителя также неизвестны;
- отводной канал включает в себя среду распространения (затухание, отражение, помехи и т.п.) через разнообразные инженерные сооружения и конструкции (бетонные ограждения, здания, заборы и т.п.), которые воссоздать на макетах невозможно или для этого требуются значительные расходы.

Существующие модели МІМО каналов не позволяют провести в полном объеме оценку помехозащищенности и скрытности *Wi-Fi* систем связи в условиях многолучевого распространения в сложных архитектурных сооружениях и зданиях [4, 5].

**Целью работы** является создание имитационной модели для оценки защищенности беспроводных систем передачи информации стандарта IEEE802.11n на основе кластерной модели отводного канала для закрытых помещений и проведение численных исследований защищенности.

### Обобщенная модель системы МІМО с отводным каналом

Типичная модель канала МІМО, состоящего из  $M$  передающих и  $N$  приёмных антенн, может быть представлена в виде [5]:

$$y = Hx + n, \quad (1)$$

где  $y$  – вектор принимаемой последовательности размерностью  $N \times 1$ ;  $x$  – вектор передаваемой последовательности размерностью  $M \times 1$ ;  $H$  – матрица основного канала размерностью  $N \times M$ ;  $n$  – вектор шума размерностью  $N \times 1$ .

Пусть в системе связи (рис. 1), содержащей один легитимный передатчик  $A$  и один легитимный приемник  $B$ , появляется один нелегитимный абонент  $C$  (нарушитель). Он может принимать сигналы передатчика, а также оказывать мешающее воздействие на легитимный приемник –  $z$ .

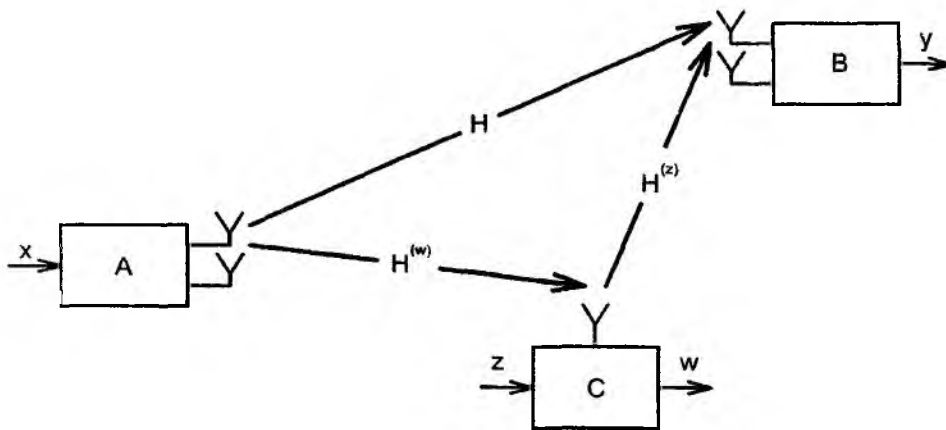


Рис. 1

Как видно из рис. 1, на вход приёмника  $B$  поступают два сигнала: один от передатчика, второй от нелегитимного абонента (мешающее воздействие). Отводным каналом назовём канал от входа передатчика  $A$  до выхода нелегитимного приёмника  $C$ . Будем считать, что отсутствует взаимное влияние между приёмниками  $A$  и  $B$ , а также между постановщиком помех нарушителя и легитимным передатчиком. Это приближение может быть оправдано большим расстоянием терминала нарушителя от легитимного канала связи. Обозначим матрицу распространения мешающего сигнала  $z$  через  $H^{(z)}$ . Тогда сигнал на входе легитимного приёмника можно записать как

$$y = Hx + H^{(z)}z + n, \quad (2)$$

а сигнал на входе приёмника отводного канала будет иметь вид

$$w = H^{(w)}x + n, \quad (3)$$

где  $H^{(w)}$  – матрица отводного канала;  $w$  – вектор сигналов, принимаемый нелегитимным приёмником.

Рассмотрим особенности модели канала MIMO для стандарта IEEE.802.11n. В основе рекомендованной стандартом IEEE.802.11n канальной модели лежит кластерный подход, описанный в работах [6] и [7]. Модель канала MIMO для помещения основана на предположении, что канал распространения описывается группами объектов (кластеров). Передаваемый сигнал, отражаясь от этих объектов, приходит на приёмную антенну и состоит из групп лучей (рис.2). Каждый луч приходит со своим затуханием и задержкой. Группы лучей можно объединить в кластеры, в пределах которых их затухание соответствует экспоненциальному закону, при этом затухание амплитуды самих кластеров также описывается экспоненциальным законом (5).

Импульсная характеристика канала, будет иметь вид

$$h(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \beta_{kl} e^{j\theta_{kl}} \delta(t - T_l - \tau_{kl}), \quad (4)$$

где  $h(t)$  – импульсная характеристика канала;  $\beta_{kl}$  – модуль коэффициента распространения  $k$ -ого луча в  $l$ -м кластере;  $\theta_{kl}$  – фазовый угол коэффициента распространения  $k$ -ого луча в  $l$ -м кластере;  $T_l$  – задержка распространения  $l$ -ого кластера;  $\tau_{kl}$  – задержка распространения  $k$ -ого луча в  $l$ -м кластере.

$$\overline{\beta_{kl}^2} = \overline{\beta^2(T_l, \tau_{kl})} = \overline{\beta^2(0,0)} e^{-T_l/\Gamma} e^{-\tau_{kl}/\gamma}, \quad (5)$$

где  $\overline{\beta_{kl}^2}$  – среднее значение затухания мощности  $k$ -ого луча в  $l$ -м кластере;  $\overline{\beta^2(0,0)}$  – среднее значение коэффициента затухания мощности прямого луча (LOS);  $\Gamma$  – постоянная затухания амплитуды кластеров;  $\gamma$  – постоянная затухания амплитуды лучей.

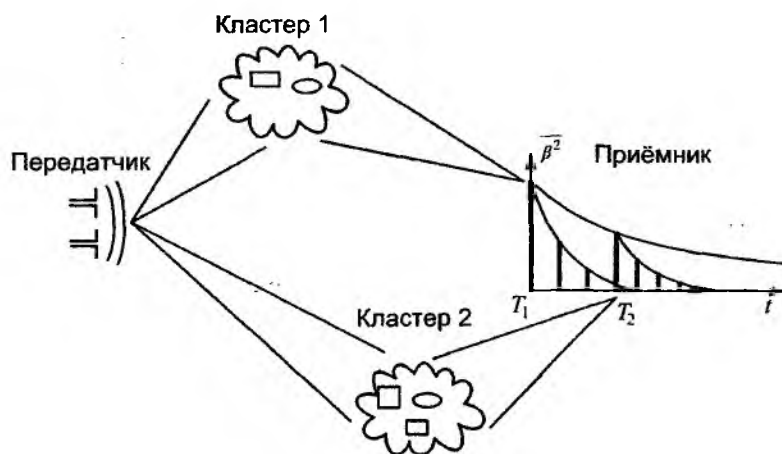


Рис. 2

В общем случае сигнал на входе приёмника описывается формулой

$$y(t) = H_{LOS}x(t - \tau_{LOS}) + H_1x(t - \tau_{LOS} - \tau_1) + H_2x(t - \tau_{LOS} - \tau_2) + \dots + H_Kx(t - \tau_{LOS} - \tau_K), \quad (6)$$

где  $H_{LOS}$  – коэффициент затухания прямого луча;  $\tau_{LOS}$  – время распространения прямого луча;  $K$  – количество отраженных лучей;  $H_1, H_2, \dots, H_K$  – коэффициенты затухания отраженных лучей.

Предположим, что количество кластеров  $L=1$  и обозначим  $H_{LOS}=H_0$ ,  $\tau_{LOS}=\tau$ ,  $\tau_0=0$ . Тогда из (6), (2) и (3):

$$y(t) = \sum_{k=0}^K H_k x(t - \tau - \tau_k) + \sum_{k=0}^K H_k^{(z)} z(t - \tau^{(z)} - \tau_k^{(z)}) + n(t), \quad (7)$$

$$w(t) = \sum_{k=0}^K H_k^{(w)} x(t - \tau^{(w)} - \tau_k^{(w)}) + n(t), \quad (8)$$

где  $\tau^{(z)}$  – время распространения луча от постановщика помех до легитимного приёмника;  $\tau^{(w)}$  – время распространения луча в отводном канале;  $H^{(z)}$  – коэффициент затухания луча в канале «постановщик помех – легитимный приёмник»;  $H^{(w)}$  – коэффициент затухания луча в отводном канале.

Как было показано в [7], интервалы прихода лучей одного кластера одинаковы, т. е.

$$\tau_k = k\tau_1. \quad (9)$$

Предположив, что помеха отсутствует,  $w(t)=0$ , и подставив выражение (9) в формулу (7) получим

$$y(t) = \sum_{k=0}^K H_k x(t - \tau - k\tau_1) + n(t). \quad (10)$$

Первое слагаемое является математической моделью дискретного КИХ-фильтра. Используя подстановку (12) и (13), получим:

$$\tilde{y}(m) = \sum_{k=0}^K H_k x(m - k\tau_1), \quad (11)$$

$$m = t - \tau, \quad (12)$$

$$y(t) = \tilde{y}(t - \tau) + n(t), \quad (13)$$

Таким образом, канал распространения может быть представлен в виде дискретного КИХ-фильтра.

## Реализация имитационной модели в среде Matlab

Рассмотрим случай, когда количество антенн на передатчике и легитимном приёмнике одинаково  $M=N=2$ , а на нелегитимном приёмнике одна антенна. Тогда схема системы MIMO с отводным каналом будет иметь вид, приведенный на рис. 3.

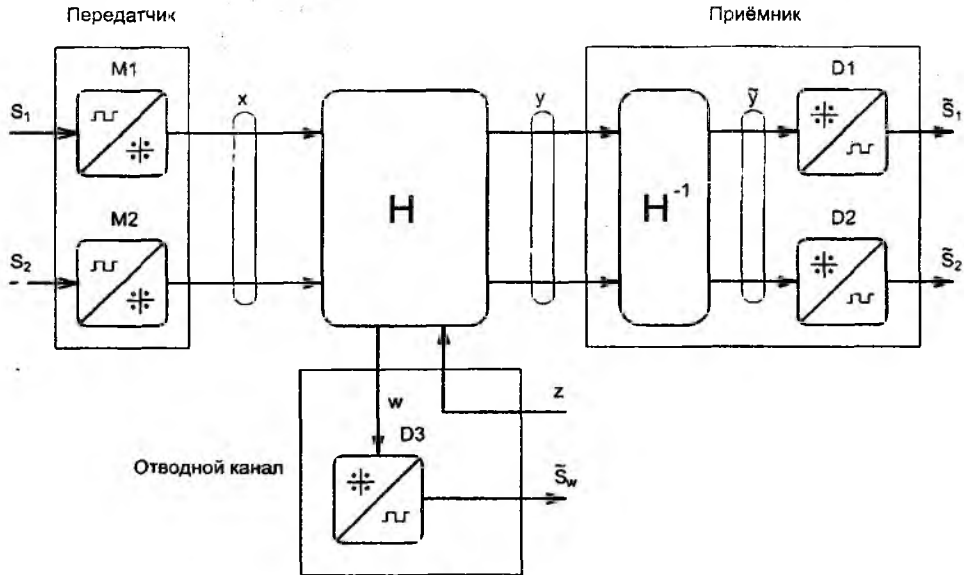


Рис. 3

На рис. 3 представлены следующие элементы модели:  $M_1$  и  $M_2$  – модуляторы;  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  – демодуляторы;  $S_1$ ,  $S_2$  – входные битовые последовательности;  $\tilde{S}_1$ ,  $\tilde{S}_2$  – выходные битовые последовательности;  $\tilde{S}_w$  – битовая последовательность на выходе отводного канала.

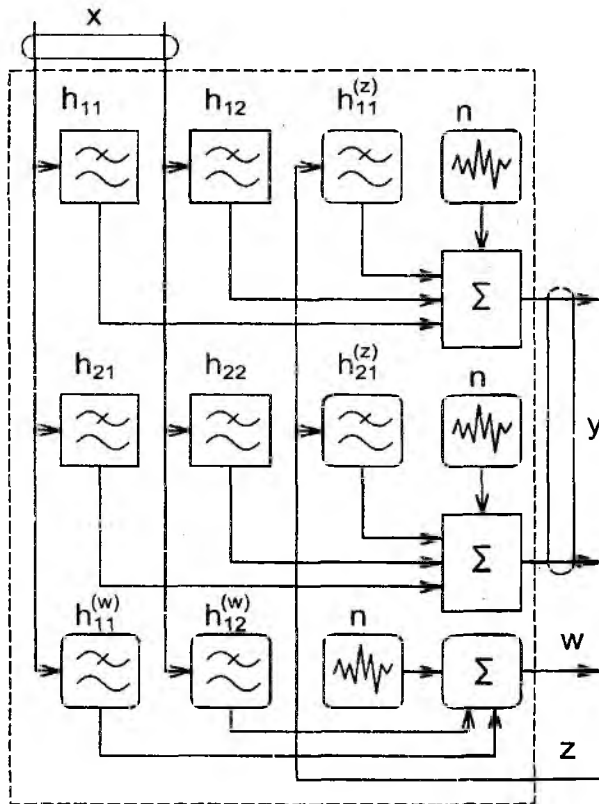


Рис. 4

Основу модели составляет блок  $H$ , имитирующий работу канала во временной области. Реализация этого блока представлена на рис. 4. Элементы  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$ ,  $h_{11}^{(w)}$ ,  $h_{12}^{(w)}$ ,  $h_{11}^{(z)}$ ,  $h_{21}^{(z)}$  являются КИХ-фильтрами, импульсная характеристика которых рассчитывается на основе модели [8], построенной в среде Matlab. Сигнал на входе легитимного приёмника  $y$  состоит из суммы сигналов: два основных сигнала от передающих антенн  $x$ , пропущенных через фильтр, имитирующий основной канал распространения  $A-B$  –  $h$ ; мешающего воздействия  $z$ , пропущенного через фильтр, имитирующий канал  $(C-B)$  –  $h^{(z)}$ ; шум  $n$ .

Элементы  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$  – элементы основного канала  $(A-B)$ ;  $h_{11}^{(w)}$ ,  $h_{12}^{(w)}$  – элементы отводного канала  $(A-C)$ ;  $h_{11}^{(z)}$ ,  $h_{21}^{(z)}$  – элементы канала помехи  $(C-B)$ ;  $n$  – источники нормального гауссового шума с нулевым математическим ожиданием.

## Верификация модели

Для верификации математической имитационной модели, построенной в среде Matlab, рассмотрим случай, когда в канале передачи отсутствуют отражения и помехи, а антенные решетки расположены перпендикулярно направлению распространения. График зависимости вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум  $E_b/N_0$  для такого случая, согласно [9], изображен на рис. 5 сплошной линией, а результаты моделирования по предложенной модели обозначены на рис.5 пунктирной линией.

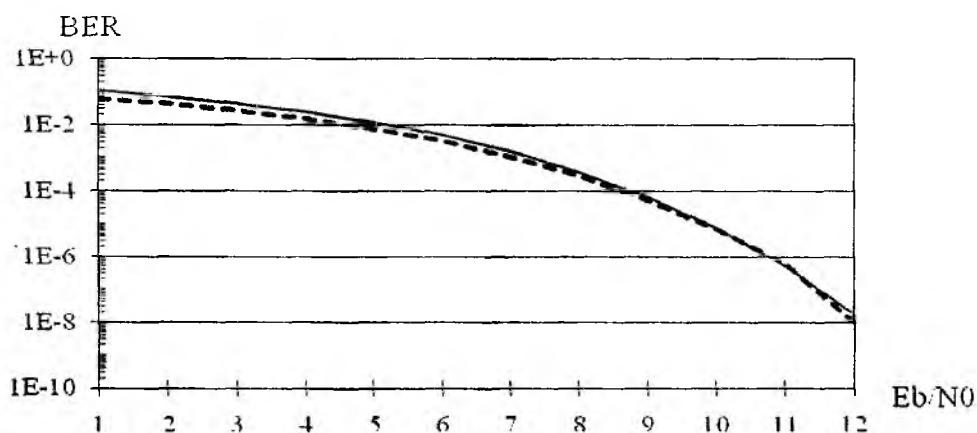


Рис. 5

Результаты моделирования повторяют теоретические данные, что говорит об адекватности предложенной модели.

## Заключение

Получена имитационная модель, которая позволяет учесть влияние отводного канала на работу системы MIMO на физическом уровне. Предлагаемая модель, в отличие от известных, позволяет оценить влияние отводного канала на защищенность легитимного канала связи.

Данная модель верифицирована и может быть использована для расчёта защищенности каналов с различной геометрией и прогнозирования их слабых мест.

Дальнейшим развитием модели является учёт взаимного влияния антенн приёмника и передатчика, учёт взаимного влияния антенн в антенной решетке, а также их поляризации и направленности, учёт изменения фазы при отражении от кластеров, а также учёт движения кластеров и абонентов в системе передачи.

Данные численных экспериментов, полученные на этой модели, будут приведены во второй части статьи.

**Список литературы:** 1. Сердюков П.Н., Бельчиков А.В., Дронов А.Е. и др. Защищенные радиосистемы цифровой передачи информации. – М.: АСТ, 2006. – 403 с. 2. Wyner A.D. The wire-tap channel // Bell System Technical Journal. – 1975. – Vol. 54, № 8. – pp. 1355–1387. 3. Oggier F, Hassibi B. The MIMO Wiretap Channel // ISCCSP 2008. – Malta, 2008. – P. 213–218. 4. Khisti A., Wornell G., Wiesel A., Eldar Y. On the Gaussian MIMO Wiretap Channel // IEEE Int. Symposium on Inf. Theory. – Nice, 2007. – P. 2471–2475. 5. Erceg V. Indoor MIMO WLAN Channel Models // IEEE 802.11-03/940r4. – 2004. 6. Saleh A.A.M., Valenzuela R.A. A statistical model for indoor multipath propagation // IEEE J. Select. Areas Comm. – 1987. – T. 5. – P. 128–137. 7. Medbo J., Schramm P. Channel models for HIPERLAN-2 // ETSI/BRAN document no. 3ERI085B. – 1998. 8. 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). 9. Proakis, J. G. Digital Communications. 4th ed. – McGraw-Hill, 2001. – P. 271-272.

Харьковский национальный  
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 15.01.2011