

## Выводы

Обобщенный инвариантный метод передачи позволяет использовать набор сигналов, не ограниченный условием подобия их форм, как это имеет место в частном случае при передаче сообщений отношением длин однонаправленных векторов сигналов. Разнообразие форм используемых сигналов способствует существенному увеличению информационной защищенности передаваемых сообщений по сравнению с упомянутым выше методом. Необходимы дальнейшие исследования обобщенного метода передачи сообщений с целью анализа его помехозащищенности.

## Литература

1. Окунев Ю.Б. Системы связи с инвариантными характеристиками помехоустойчивости. М.: Связь, 1973. – 80 с.
2. Лебедянцева В.В. Принцип симметрии и синтез системы передачи информации // Материалы ВНТК «Применение методов теории информации для повышения эффективности и качества радиоэлектронных систем». М.: Радио и связь, 1984. – С. 78
3. Лебедянцева В.В. Разработка и исследование методов анализа и синтеза инвариантных систем связи. Дисс. д.т.н. Новосибирск, 1995.
4. Ибрагимов М.Х. Группы преобразований в математической физике. М.: Наука, 1983. – 280 с.
5. Рашевский П.К. Риманова геометрия и тензорный анализ. М.: Наука, 1964. – 664 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. – 832 с.
7. Лебедянцева В.В., Морозов Е.В. Оценки информационной защищенности и помехоустойчивости инвариантной системы связи // Доклады ТГУСУР. Ч.1, №1(21), 2010. – С. 152-155.

## GENERALIZED INVARIANT METHOD MESSAGING AND ASSESSMENT OF ITS INFORMATION SECURITY

Lebedyantsev V.V.

**In work the generalized invariant of linear communication channels in the form of the relation of volumes of the m-dimensional parallelepipeds formed in alarm space by the relevant groups of transmitted signals kept by channels is synthesized. The algorithm of transmission of messages using this invariant is developed. The assessment of information security of the generalized invariant method of transmission of messages is given.**

**Keywords:** group of transformations, the invariant, the generalized invariant method of transfer, information security.

Лебедянцева Валерий Васильевич, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой автоматической электросвязи Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (г. Новосибирск). Тел. (8-383) 269-82-42; 8-913-010-73-01. E-mail: lebv@sibsutis.ru

УДК691.396

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ММО В КАНАЛЕ С ПАМЯТЬЮ

Коняева О.С.

В статье рассматривается система ММО  $2 \times 2$  в канале связи с памятью. Были получены оценки достоверности принятой последовательности символов (BER) для различных алгоритмов, компенсирующих помехи и искажения сигнала, – алгоритм сведения к нулю (ZF) и алгоритм наименьших квадратов (MMSE). Получены зависимости вероятности ошибки на бит от отношения «сигнал/шум» в месте приема для различной памяти канала.

**Ключевые слова:** ММО, алгоритм наименьших квадратов, алгоритм сведения к нулю, битовый ко-

эффициент ошибок, канал с памятью, межсимвольная интерференция.

## Введение

В современных высокоскоростных системах передачи дискретных сообщений значительно улучшить емкость сети, спектральную эффективность и скорость передачи информации можно при использовании технологии с многоканальным входом и многоканальным выходом (Multiple Input Multiple Output – MI-MO),

при этом каждой паре передающей/приемной антенн можно соотнести отдельный канал передачи информации. Можно утверждать, что канальная скорость передачи данных повышается пропорционально числу используемых антенн. Чаще всего имеется равное число антенн на приемной и передающей стороне, что позволяет достигнуть максимальной скорости передачи данных. В передатчике устанавливается делитель потоков, который будет разбивать информацию для передачи на несколько низкоскоростных подпотоков в зависимости от числа антенн. Затем на передающей стороне каждый из данных подпотоков пересылается через соответствующую антенну. Для обеспечения слабой корреляции сигналов антенны системы устанавливаются с некоторым пространственным разнесением. В одном из возможных способов организации технологии ММО сигнал передается от каждой антенны с различной поляризацией, что позволяет идентифицировать его на приеме. Главное, что каждый из передаваемых сигналов оказывается «помеченным» самой средой передачи (задержкой во времени, затуханием, межсимвольной и межканальной интерференцией и другими искажениями).

На приемной стороне также устанавливается несколько антенн с некоторым пространственным разнесением. Полученные потоки данных поступают на приемные устройства, их число соответствует количеству антенн и каналов связи. Поскольку на каждое приемное устройство поступают информационные потоки от всех антенн системы, каждый приемник снабжен сумматором, который выделяет из общего потока энергию сигнала только того тракта, за который он отвечает. Делает он это либо по какому-либо заранее предусмотренному признаку, которым был снабжен каждый из сигналов, либо благодаря анализу задержки, затухания, сдвига фазы [1], то есть набору искажений маркеров среды распространения.

### Система ММО

Схема системы ММО с  $N$  передающими и  $M$  приемными антеннами представлена на рис. 1. Данные поступают в ММО передатчик, формируются и распределяются между антеннами. Далее сигнал передается по каналу  $\mathbf{H}$ . Когда сигнал достигает приемных антенн, приемник ММО выполняет работу по разделению и обработке принимаемого потока сигналов для воспроизведения данных, которые были переданы.

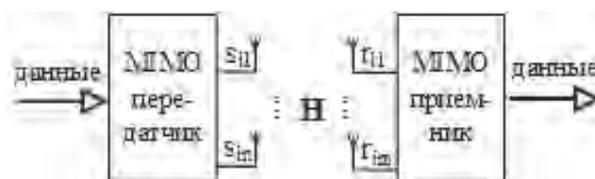


Рис. 1. Блок-схема простой системы ММО с  $N$  передающими и  $M$  приемными антеннами

Если канальная матрица  $\mathbf{H}$  задана, то принимаемый сигнал в матричной форме записывается как

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{r}$  – вектор принятых сигналов,  $\mathbf{s}$  – вектор переданных символов,  $\mathbf{H}$  – матрица, описывающая каналы между передающими антеннами  $N$  и приемными антеннами  $M$ ;  $\mathbf{n}$  представляет собой вектор отсчетов гауссовского шума. Задача приема состоит в том, чтобы компенсировать влияние канала на передаваемый сигнал. В канале с памятью главным «мешающим» фактором является рассеяние энергии передаваемого сигнала во времени, что порождает явление межсимвольной интерференции (МСИ). Один из способов борьбы с МСИ заключается в нахождении такой матрицы  $\mathbf{W}$ , чтобы  $\mathbf{H} \cdot \mathbf{W} = \mathbf{I}$ , если  $N < M$ , или  $\mathbf{W} \cdot \mathbf{H} = \mathbf{I}$ , если  $N \geq M$ . Предполагая знание о канале  $\mathbf{H}$  на приемной стороне, матрица  $\mathbf{W}$  может быть найдена с помощью обратной матрицы Мура-Пентроуза [2]:

$$\mathbf{W} = \begin{cases} (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H, & \text{если } N \geq M; \\ \mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H)^{-1}, & \text{если } N < M, \end{cases}$$

где  $(\mathbf{H})^H$  – знак эрмитово-сопряженной матрицы,  $(\mathbf{H})^{-1}$  – знак обратной матрицы.

### ММО канал

Свойства нестационарного ММО канала, соединяющего  $n$ -ый передающий элемент с  $m$ -ым принимающим элементом, могут быть описаны при помощи импульсной характеристики (ИХ)  $h_{nm}(l)$ . Эти элементы формируют матрицу импульсных отсчетов  $\mathbf{G}(l)$ , имеющую размер  $M \times N$ , элементы которой могут случайным образом изменяться с течением времени.

В общем случае сигнал на приемной стороне можно записать как [3]:

$$\mathbf{r}(k) = \sum_{l=0}^{L-1} \mathbf{G}(l)\mathbf{s}(k-l) + \mathbf{n}(k), \quad (2)$$

где  $r(k)$  – это вектор принимаемого сигнала в  $M$ -ой приемной антенне в  $k$ -ый дискретный отсчет времени;  $s(k)$  – это вектор передаваемого сигнала  $N$ -ой передающей антенны в  $k$ -ый дискретный отсчет времени;  $n(k)$  – вектор аддитивного белого гауссовского шум размерностью  $M \times 1$ ;  $\mathbf{G}(l)$  – матрица  $M \times N$  ММО канала, состоящая из отсчетов  $l$  ИХ каналов;  $L$  – длина ИХ (память канала). Формула (2) представляет формулу (1) через соотношение свертки. Тогда канальная матрица  $\mathbf{H}$  в (1) является блочной матрицей Телпица вида

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}(0) & & & \\ \vdots & \ddots & & \\ \mathbf{G}(L-1) & \cdots & \mathbf{G}(0) & \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & \mathbf{G}(L-1) \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{G}(l)$  – матрица  $M \times N$ , состоящая из  $l$  отсчетов импульсной характеристики канала между  $n$  передающей и  $m$  приемной антеннами:

$$\mathbf{G}(l) = \begin{bmatrix} h_{11}(l) & \cdots & h_{n1}(l) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{1m}(l) & \cdots & h_{nm}(l) \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим модель канала ММО с конфигурацией  $2 \times 2$ , то есть с 2 передающими и 2 приемными антеннами, как это показано на рис. 2. Поскольку имеется две передающие антенны, можно группировать передаваемые символы  $\{s_1, s_2, s_3, s_4, \dots, s_n\}$  по два. В первый интервал времени передаются  $s_1$  и  $s_2$  с помощью первой и второй антенн, во второй временной интервал аналогично передаются символы  $s_3$  и  $s_4$  и т.д. Таким образом, скорость передачи увеличивается в два раза.

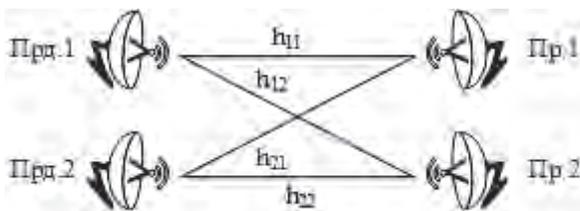


Рис. 2. Система ММО с конфигурацией  $2 \times 2$

На рис. 2 показаны различные пути распространения сигнала  $h_{nm}$ . Для  $l$ -го отсчета импульсной характеристики матрица  $\mathbf{G}(l)$  имеет вид

$$\mathbf{G}(l) = \begin{bmatrix} h_{11}(l) & h_{21}(l) \\ h_{12}(l) & h_{22}(l) \end{bmatrix}.$$

Для моделируемой системы ММО  $2 \times 2$  принимаемые сигналы в первой и второй приемных антеннах, соответственно, равны:

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{h}_{11} \otimes \mathbf{s}_1 + \mathbf{h}_{21} \otimes \mathbf{s}_2 + \mathbf{n}_1,$$

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{h}_{12} \otimes \mathbf{s}_1 + \mathbf{h}_{22} \otimes \mathbf{s}_2 + \mathbf{n}_2,$$

где  $\mathbf{h}_{nm}$  – ИХ канала между  $n$ -ой передающей и  $m$ -ой приемной антеннами;  $\mathbf{s}_1$  и  $\mathbf{s}_2$  являются передаваемыми символами из первой и второй передающих антенн;  $\mathbf{n}_1$  и  $\mathbf{n}_2$  – шум первой и второй приемной антенны,  $\otimes$  – знак свертки.

### Эквалайзер

Одним из самых важных компонентов ММО приемника является эквалайзер. На рис. 3 изображена схема ММО пространственно-временного эквалайзера [2]. Сигнал эквалайзера может быть описан выражением  $\mathbf{y} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{r}$ , где  $\mathbf{y}$  – это вектор символов, прошедших обработку в эквалайзере,  $\mathbf{W}$  – матрица коэффициентов эквалайзера,  $\mathbf{r}$  – вектор принятых сигналов.

В рассматриваемой системе ММО работа эквалайзера будет основана на алгоритме сведения к нулю (Zero Forcing, ZF) [4-6]. Весовые коэффициенты эквалайзера регулируются таким образом, чтобы подавить межсимвольные искажения путем обращения их в нуль за счет нахождения обратной канальной матрицы  $\mathbf{H}$ . Теоретически любой канал может быть компенсирован ZF эквалайзером при достаточно точном описании канала.

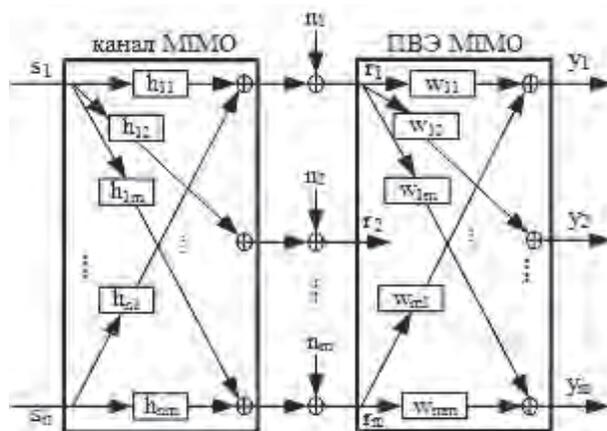


Рис.3. Структура ММО эквалайзера

Тогда необходимо найти матрицу  $\mathbf{W}$ , такую, чтобы  $\mathbf{H} \cdot \mathbf{W} = \mathbf{I}$ . Данное ограничение для линейного эквалайзера на основе алгоритма сведения к нулю имеет вид  $\mathbf{W}_{ZF} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H$ . Алгоритм является концептуально простым и легким в реализации, но не учитывающим шум приемни-

ка, что в итоге может привести к ухудшению помехоустойчивости приема. Учет отношения «сигнал/шум» (ОСШ) осуществляется в алгоритме наименьших квадратов, где происходит минимизация среднеквадратической ошибки между передаваемыми и входными символами (Minimum Mean Square Error, MMSE) [4-5; 7]. Необходимо найти такую матрицу  $\mathbf{W}$ , которая минимизировала бы среднеквадратическое значение ошибок, то есть  $E\{[\mathbf{W}\mathbf{r} - \mathbf{s}][\mathbf{W}\mathbf{r} - \mathbf{s}]^H\}$ :

$$\mathbf{W}_{MMSE} = \left( \mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{N_0}{E_B} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}^H,$$

где  $E_B / N_0$  – значение ОСШ.

**Результаты моделирования**

Общая схема моделируемой системы MIMO с конфигурацией 2x2 представлена на рис. 4. Обе ветви на передаче генерируют независимые потоки данных, которые перемешиваются в канале MIMO, описанном выше.

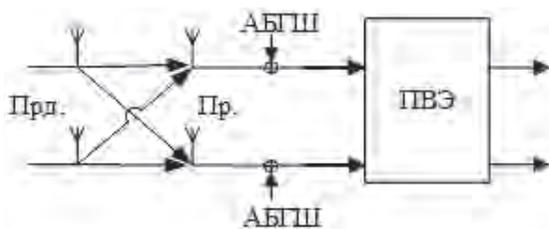


Рис. 4. Общая блок-схема моделируемой MIMO-системы с конфигурацией 2x2

В приемнике потоки данных также обрабатываются отдельно, за исключением эквалайзера. Промодулированный сигнал (используется двоичная фазовая манипуляция ФМ-2) проходит в MIMO канал, представляющий из себя канал с памятью. В приемнике к каждому потоку сигналов добавляется независимая реализация аддитивного белого гауссовского шума.

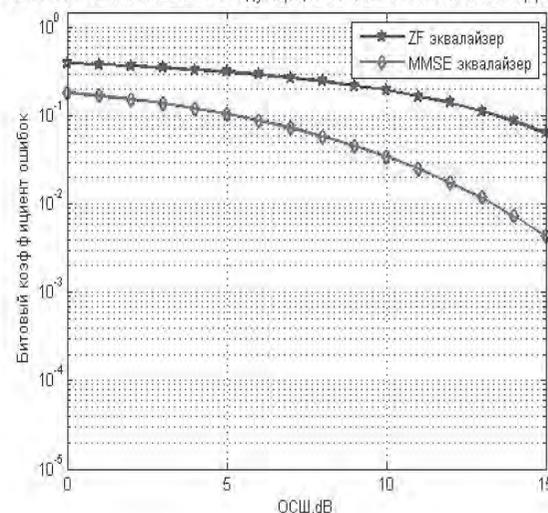
После этого сигнал поступает в эквалайзер, где осуществляется компенсация межсимвольной интерференции с помощью ZF и MMSE алгоритмов. Завершением является процесс декодирования и подсчет вероятности битовых ошибок в зависимости от отношения «сигнал/шум» BER.

Моделирование работы схемы, представленной на рис. 4, осуществлялось исходя из следующих условий:

- моделируемый канал является каналом с МСИ;

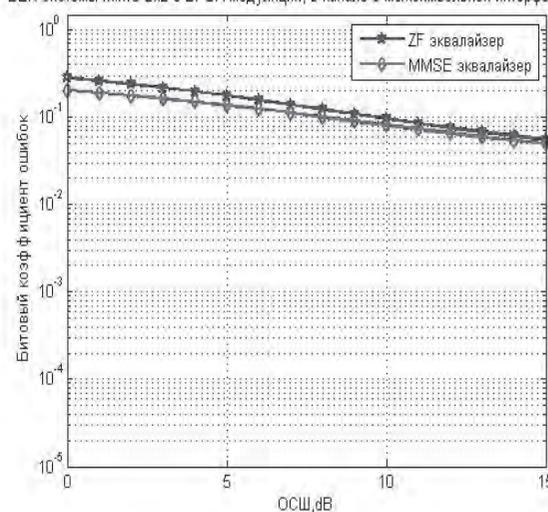
- на приемной стороне, шум имеет гауссовскую ФРВ;
- канал  $h_{nm}$  известен на приемной стороне;
- длины всех ИХ каналов совпадают;
- обработка  $10^6$  символов осуществлялась блоками по  $10^3$  символов.

BER системы MIMO 2x2 с BPSK модуляции, в канале с межсимвольной интерференцией



а)

BER системы MIMO 2x2 с BPSK модуляции, в канале с межсимвольной интерференцией



б)

Рис. 5. BER MIMO системы с конфигурацией 2x2 при разной длине памяти канала: а)  $L = 3$ ; б)  $L = 5$

На рис. 5а-б представлен график BER в зависимости от ОСШ, соответственно для ZF и MMSE эквалайзеров, при длине канальной памяти  $L = 3$ :

- $h_{11} = [0,2 \ 0,9 \ 0,3]$ ;
- $h_{12} = [-0,3 \ 0,5 \ 0,1]$ ;
- $h_{21} = [0,3 \ 0,6 \ -0,1]$ ;
- $h_{22} = [-0,2 \ 0,8 \ 0,2]$ ;

и при канальной памяти длиной  $L = 5$ :

- $h_{11} = [0,2 \ 0,9 \ -0,3 \ 0,5 \ 0,1]$ ;
- $h_{12} = [-0,1 \ 0,5 \ -0,4 \ 0,2 \ -0,2]$ ;

$$h_{21} = [0,1 \ 0,6 \ -0,2 \ 0,3 \ -0,1];$$

$$h_{22} = [0,2 \ 0,8 \ -0,4 \ 0,4 \ -0,1].$$

### Выводы

Представлена модель системы ММО с конфигурацией  $2 \times 2$ , работа которой основана на ZF эквалайзере и MMSE эквалайзере. Моделью канала ММО является канал с МСИ. По результатам моделирования построены графики вероятности битовой ошибки от ОСШ для двух видов алгоритмов фильтрации (ZF и MMSE) при длине памяти канала  $L = 3$  и  $L = 5$ . Из результатов моделирования следует, что алгоритм эквалайзера MMSE обеспечивает меньшее значение вероятности ошибки, чем ZF. Например, для вероятности ошибки  $10^{-1}$  энергетический выигрыш составит примерно 4,5 дБ, при длине памяти канала  $L = 3$ . При увеличении памяти канала ( $L = 5$ ) битовый коэффициент ошибок с ростом ОСШ медленнее приближается к нулю, а кривые BER ZF и MMSE эквалайзеров мало отличимые.

### Литература

1. <http://celnet.ru/mimo.php>
2. Tryggvi Ingason, Liu Haonan. Line-of-Sight MIMO for Microwave Links Adaptive Dual Polarized and Spatially Separated Systems. Göteborg, Sweden, 2009. – .117 p.
3. Kung S.Y., Xinying Zhang, Myer C.L. A recursive QR approach to adaptive equalization of time-varying MIMO channels // Communications in information and systems. Vol. 5, №2, 2005. – P. 169-196.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2003. – 1104 с.
5. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000. – 800с.
6. Qureshi U.H. Adaptive equalization // Proceedings of the IEEE. Vol.73, №9, 1985. – P. 1349-1387.
7. Saltzburg B. R. Intersymbol Interference Error Bounds with Application to Ideal Bandlimited Signaling // IEEE Trans. Inform. Theory. Vol. IT-14, 1968. – P. 563-568.

## THE MIMO SYSTEM MODEL IN MEMORY CHANNEL

Konyaeva O.S.

The article discusses a  $2 \times 2$  MIMO system in communication memory channel. Were obtained the bit error rate (BER) for a variety of algorithms that compensate for signal distortions and noise – a Zero Forcing algorithm (ZF) and a Minimizing Mean Square Error algorithm (MMSE). Showing the implementation BER for different lengths of memory communication channel.

**Keywords:** MIMO, Zero Forcing algorithm, Minimizing Mean Square Error algorithm, bit error rate, memory channel, intersymbol interference.

Коняева Ольга Сергеевна, ассистент Кафедры программного обеспечения и управления технических систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Тел. (8-846) 228-00-13; 8-927-718-71-90. E-mail: konyaeva2012@gmail.com

## ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

УДК 004.7

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАФИКА С ТЯЖЕЛОХВОСТНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ $M_2/M/1$

Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Горелов Г.А.

В статье представлен анализ «тяжелохвостных» распределений и получено решение по среднему времени ожидания для СМО  $M_2/M/1$ . Совместно с авторской программой по восстановлению моментных характеристик распределения интервалов между пакетами входящего трафика такая методика позволяет рассчитать характеристики входящего трафика методами теории массового обслуживания.

**Ключевые слова:** моментные характеристики распределение трафика, анализатор трафика, программа Wireshar, среднее время ожидания в очереди.

### Введение

Известно, что теория массового обслуживания (ТМО) не дает точного ответа при анализе