

УДК 621.391.1

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО КАНАЛАМ РАДИОСВЯЗИ

НИКОЛАЙЧУК Н.В.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

ENHANCEMENT OF INTERFERENCE IMMUNITY OF TRANSMISSION DISCRETE INFORMATION BY RADIO COMMUNICATION CHANNELS

NIKOLAYCHUK N.V.

Odessa National Academy of Telecommunications n.a. O.S. Popov

***Аннотация.** В обзоре приведена классификация методов разнесения, используемых для повышения помехоустойчивости передачи дискретной информации по каналам радиосвязи. Рассмотрены возможности нового метода разнесения, основанного на использовании пространственно-временного кодирования. Намечены пути дальнейших исследований.*

***Abstract.** In the review classification of the diversity methods used for a raise of a noise immunity of transmission of the discrete information by channels of a radio communication is given. Possibilities of a new method of the diversity based on use of space-time coding are considered. Ways to the further researches are planned.*

ВВЕДЕНИЕ

В современных системах связи существует необходимость повышения пропускной способности. Например, в сотовых системах связи, высокоскоростных локально-вычислительных сетях и др. пропускная способность может быть увеличена с помощью расширения полосы частот или повышения излучаемой мощности. Тем не менее, применимость этих методов имеет недостатки, так как из-за требований биологической защиты и электромагнитной совместимости повышение мощности и расширение полосы частот ограничено. Поэтому если в системах связи возможные повышения излучаемой мощности и расширение полосы частот не обеспечивают необходимую скорость передачи данных, то одним из самых эффективных способов решений этой проблемы может быть применение адаптивных антенных решёток со слабо коррелированными антенными элементами. Системы связи, которые используют такие антенны, получили название ММО систем (Multiple Input Multiple Output).

ВАРИАНТЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ

Пространственное разделение подканалов в системах ММО может быть реализовано следующими способами:

- 1 Способом разнесения потоков по задержке.
- 2 Способом разнесения посредством пространственно-временного кодирования ПВК (логическое развитие первого способа).
- 3 Способом ортогонального блочного кодирования (в частности, методом ортогонального блочного кодирования Аламоути).
- 4 Способом ортогонального кодирования методом прямого расширения спектра DSSS.
- 5 Способом введения диаграммообразующей схемы (ДОС).
- 6 Способом ортогонального расположения частот сигналов (несущих) по передающим трактам.

ММО системы можно классифицировать по наличию или отсутствию обратной связи:

- 1 ММО с “открытой петлёй” (open-loop). В данном случае оценки канала на приемном конце используются для коррекции искажений, вносимых каналом.

- 2 MIMO с "замкнутой петлей" (closed-loop). Здесь помимо оценки канала на приеме и компенсации помех производится передача этих оценок на передающую сторону по т.н. обратному (feedback) каналу. Основываясь на принятой информации, передатчик производит перераспределение мощностей в своих передающих трактах с тем, чтобы увеличить мощность трактов, передающих по каналам с высокой интенсивностью замираний, а также внести коррекцию по амплитуде и фазе при формировании диаграммы направленности антенны.

Известно две группы методов ПВК в каналах MIMO:

- пространственно-временное *решетчатое* кодирование (ПВРК),
- пространственно-временное *блоковое* кодирование (ПВБК).

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПО ТЕХНОЛОГИИ MIMO

Методы передачи информации в современных системах широкополосного беспроводного доступа базируются на использовании т.н. технологии MIMO (Multiple Input-Multiple Output – множественный вход-множественный выход). Впервые об этой технологии упоминалось в кратком сообщении A.R. Kaye, D.A. George, W. Van Etten, J. Winters, J. Salz из Bell Laboratories(USA). Затем последовали демонстрация преимуществ и особенностей метода на базе лабораторного прототипа в 1998г. и включение идей MIMO в стандарты широкополосного доступа IEEE 802.11n и IEEE 802.16e[14]. Основная идея технологии MIMO иллюстрируется на рис.1. Передающая часть системы содержит M передатчиков ($T_1..T_M$) с передающими антеннами, тогда как приемная часть содержит N приемников и приемных антенн ($R_1..R_N$). Считается, что замирания порождаются рассеивающей средой H распространения радиосигнала. На рисунке стрелками показано, что сигнал любого из передатчиков T_i может достигать входа любого из приемников ($R_1..R_N$), претерпевая замирания. Работа системы обеспечивается мультиплексором на передаче, демультимплексором на приеме и приемником максимального правдоподобия на приемной стороне.

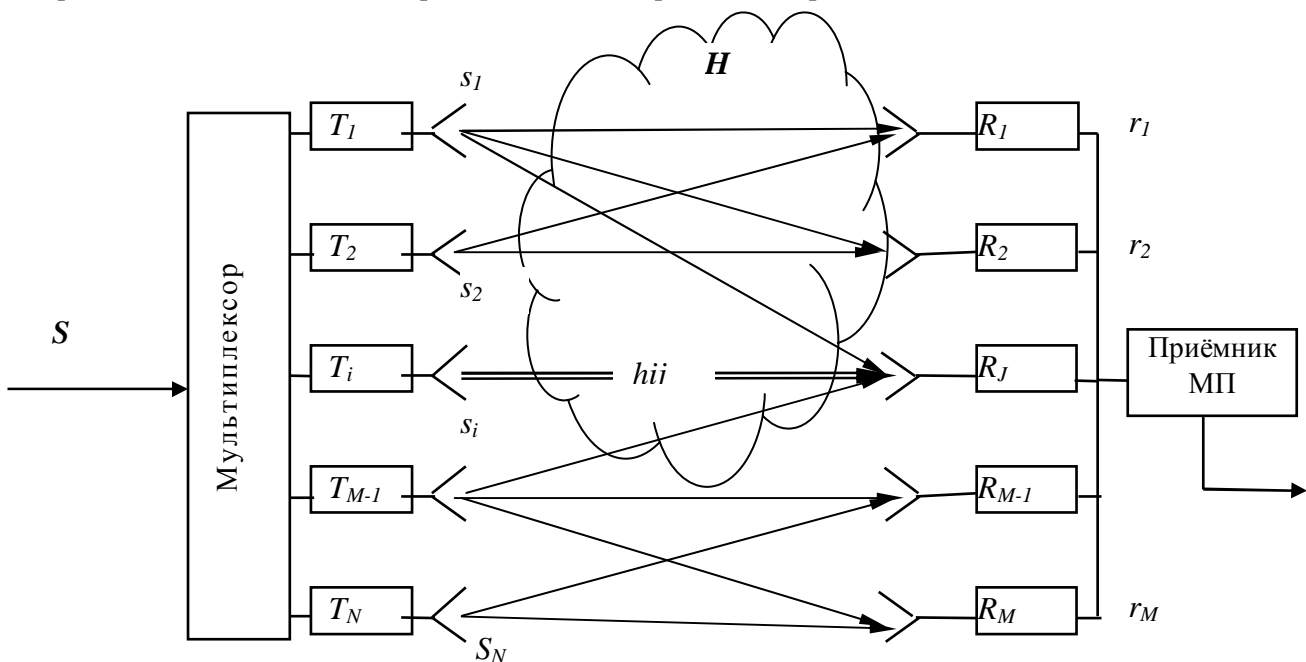


Рисунок 1 –Общая структура системы MIMO

Таким образом, вводится *пространственная избыточность*, благодаря которой удается «пронизать» турбулентную среду распространения радиосигнала и избежать влияния замираний при соответствующей обработке принятой совокупности сигналов. Говорят, что такая структура обеспечивает передачу «от объема к объему» (*from volume to volume*). Это определение, действительно, подчеркивает принципиальное отличие такой объемно-

многомерной пространственной модели канала от привычной одномерной модели, вытянутой в одну линию между передатчиком и приемником. Компактное описание процессов в системах *MIMO* ($N \times M$) удобно производить, используя матричную запись. Обозначим матрицу-строку передаваемых сигналов, как $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_N]$, матрицу коэффициентов передачи канала

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,M} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N,1} & h_{N,2} & h_{N,M-1} & h_{N,M} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

матрицу-строку шума на входах приёмных антенн $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_j, \dots, n_M]$

и матрицу-строку принятого сигнала $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_j, \dots, r_M]$. Тогда основное уравнение для системы *MIMO*, изображенной на рис. 1 можно представить так

$$\mathbf{r} = H\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2)$$

Такие структуры обычно обозначают как *MIMO*($N \times M$) (N – количество передающих антенн, M – количество приемных антенн). Здесь возможно большое разнообразие вариантов систем. В монографии [13] рассмотрены следующие частные варианты структуры *MIMO*(2×2):

- 1 Структура *MIMO*(1×2), именуемая как *SIMO* (*Single Input-Multiple Output* – один вход – много выходов). Это традиционная система радиосвязи с одним передатчиком и двумя разнесенными в пространстве антеннами и приемниками.
- 2 Структура *MIMO*(2×1), именуемая как *MISO* (*Multiple v Input-Single v Output* – много входов – один выход). В монографии [13] проведен сравнительный анализ этих систем, и показано, что они имеют одинаковую помехоустойчивость.

Тут уместно пояснить появление нового термина «*пространственно-временное кодирование*» ПВК (*Space-Time Coding – STC*). В теории информации принято под помехоустойчивым кодированием понимать процедуру, при которой в передаваемые сообщения вводится *избыточность*, которая позволяет при адекватном декодировании исправлять каналные ошибки. В традиционных методах кодирования для введения избыточности обычно используется *временной ресурс* (введение *дополнительных* символов при блоковом, либо сверточном кодировании). Появляющееся при этом снижение скорости передачи информации и есть плата за повышение помехоустойчивости. В рассматриваемых на рис.1 многоантенных системах *MIMO* помимо временного ресурса (традиционное помехоустойчивое кодирование возможно также в любом канале “ $T_i - R_j$ ”) появляется возможность использовать *пространственный ресурс* и, соответственно, ставить задачу об оптимальном введении избыточности, т. е. об оптимальных методах *пространственно-временного кодирования*, обеспечивающих наилучший обмен избыточности на помехоустойчивость. Бытует мнение, что традиционную теорию кодирования следует считать важным разделом прикладной дискретной математики. Забегая вперед, можно сказать, что при решении задач об оптимальном пространственно-временном кодировании может быть эффективно использована методология, наработанная математиками в традиционной теории кодирования для временного ресурса. Анализ публикаций показывает, что в наименованиях и текстах термины *MIMO* и *Space-Time Coding* переплетаются тесным образом. Объяснение этому простое: *MIMO* – аббревиатура системы (либо канала) с многими антеннами, а “*Space-Time Coding*” – метод передачи (метод модуляции/кодирования), сопряженный (согласованный) с таким *MIMO* каналом.

При практической реализации систем *MIMO* необходимо решать вопрос об *организации мультиплексной передачи* сигналов от передающих антенн к приемным

антеннам. Обычно используют *временное разделение сигналов*. При этом в системе организуется «кадр» передачи со всеми необходимыми в таких случаях атрибутами кадровой синхронизации («синхрослово»). Выбором метода модуляции сигналов-переносчиков решается вопрос о скорости передачи информации в системе в целом.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛА *MIMO*

Матрица коэффициентов передачи канала (1) является основной характеристикой канала *MIMO*. Анализ систем ПВК в литературе [5] основан на априорном предположении, что такой канал *квазистационарен*. Анализу статистических характеристик многолучевых каналов мобильной связи посвящен специальный раздел монографии [1, разд.15.2, рис.15.1], где утверждается, что снижение отношения сигнал/шум в службах сотовой и персональной связи в диапазоне(1-2) ГГц, обусловленное замираниями, описывается моделью Релея. Длительное время динамические свойства («быстрая» нестационарность) замираний для мобильных абонентов «гипнотизировали» исследователей систем ПВК. Достаточно скоро пришло осознание того, что имеются все основания для фиксированных служб, канал типа *MIMO* считать *квазистационарным*, в котором передающая и приемная стороны неподвижны и условия распространения радиоволн с течением времени остаются приблизительно постоянными или не меняются вообще. В большинстве публикаций [5] предполагается, что коэффициенты передачи h_{ij} , входящие в состав матрицы канала (1) неизменны на протяжении, про крайней мере, нескольких интервалов длительности сигналов. В то же время, эти коэффициенты изменяются случайным образом при изменении фиксированных диспозиций передающих и приемных антенн. Предполагается также, что статистика этих изменений подчиняется Релеевскому либо обобщенному Релеевскому распределением. В подавляющем большинстве работ по методам ПВК в каналах *MIMO* неперемным условием теоретического анализа является *квазистационарность* канала в следующей форме[5]:

–Передачу информации в структуре *MIMO* можно организовать кадрами (*frame*), которые периодически передаются и имеют специальную структуру;

–Коэффициенты передачи в матрице(1) изменяются при изменении местоположения передающих и приемных антенн;

– Коэффициенты передачи в матрице(1) остаются неизменными на интервалах нескольких (обычно двух) рядом расположенных символов. При этом рекомендуемая структура кадра имеет вид, показанный на рис.2. Такая структура подобна широко используемой форме кадра в стандарте США системы сотовой связи IS-136.



Рисунок 2 – Структура кадра системы ПВК

Кадр состоит из начальной обучающей (*training*) последовательности(ОП) и периодически повторяющихся блоков передаваемых данных, разделенных пакетами пилот-сигналов (ПС). Структура обучающей последовательности содержит информацию о номере передающей антенны (i) и допускает определение на приеме в антенне с номером(j) коэффициентов передачи h_{ij} , которые входят в состав матрицы (1). Структура ОП также обеспечивает синхронизацию по кадрам. Включение пилот-сигналов ПС перед данными обусловлено необходимостью организации в демодуляторе когерентного приема. Таким образом, все пространство между рядами передающих и приемных антенн охвачено системой *временного мультиплексирования*, техника которого давно хорошо освоена в системах сотовой мобильной связи с временным делением каналов *TDMA*. Этим, видимо, и объясняется то обстоятельство, что любая теоретическая работа из упомянутого выше обширного списка публикаций [5] по тематике *MIMO*, начинается с предположения о квазистационарности такого канала. Здесь уместно вспомнить историю развития методов передачи информации по каналам с переменными параметрами. Термин «канал с неопределенной фазой сигнала» появился в процессе попыток внедрения фазовой модуляции в системы коротковолновой

связи, когда начальная фаза принимаемого сигнала из-за многолучёвости медленно “плавала”, изменяясь незначительно на интервалах нескольких последовательно принимаемых посылок сигнала. Для решения задачи приема таких сигналов Н.Т. Петрович предложил метод относительной фазовой модуляции (ОФМ), в соответствии с которым передаваемая информация закладывается не в абсолютные значения модулируемого параметра (фазу), а в *приращения* этого параметра. В западной печати такой метод модуляции именуется как *differential phase modulation*. При этом демодуляция состояла в сравнении фаз принимаемой посылки с фазой предыдущей “опорной” посылки (“метод сравнения фаз”). Продолжая эти рассуждения, можно сформулировать задачу о поиске адекватного дифференциального метода передачи для квазистационарного канала *MIMO*. Такой подход развит в работе [15]. Фактически, использование обучающей последовательности для извлечения информации о коэффициентах передачи матрицы (1) по данным предыдущих “опорных” сигналов и есть “скрытый” дифференциальный метод. Он не лишен недостатка любых дифференциальных методов: проникновение ошибок по опорному каналу.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ МЕТОДА ПВК В КАНАЛАХ *MIMO*

С первых шагов разработки теории ПВК-*MIMO* специалисты обратились к фундаментальным положениям теории информации о пропускной способности канала. Как известно, теория информации на основе подсчета пропускной способности канала позволяет определить предельные значения скорости передачи, хотя и не указывает на конкретный метод, реализующий эту скорость. Для канала без памяти с постоянными параметрами величина нормализованной пропускной способности имеет вид

$$C = \log_2(1 + q|h|^2), \text{бит/с/Гц}, \quad (3)$$

где h – нормализованный комплексный коэффициент передачи канала и q – отношение сигнал / шум в канале. Рассматривая в составе структуры рис.1 канал *MIMO(1xM)* (один вход M выходов) пропускную способность можно представить так

$$C_{SIMO} = \log_2 \left(1 + q \sum_{j=1}^M |h_j|^2 \right), \text{бит/с/Гц}, \quad (4)$$

где h_j – коэффициент передачи канала в направлении к j -й антенне, который в этой модели считается известным на приемной стороне. Отметим важную особенность выражения (4): с увеличением числа приемных антенн M пропускная способность растет по логарифмическому закону. В общем случае информация о состоянии канала не может быть известна на передающей стороне. Поэтому при подсчете пропускной способности полагают мощности всех передатчиков одинаковыми. В этом случае для канала *MIMO(Nx1)* (N входов – один выход) пропускная способность будет

$$C_{MISO} = \log_2 \left(1 + \frac{q}{N} \sum_{i=1}^N |h_i|^2 \right), \text{бит/с/Гц} \quad (5)$$

где нормализация по N учитывает равное распределение средней мощности передаваемого сигнала по каналам передачи. Здесь также имеет место логарифмическая зависимость. В целом, используя разнесение как передающих так и приемных антенн, объединяя формулы (2) и (3) можно получить результирующее выражение для нормализованной пропускной способности канала *MIMO(NxM)* [5]:

$$C_{MIMO} = \log_2 \left[\det \left(I_M + \frac{q}{M} \mathbf{H} \mathbf{H}^T \right) \right], \text{бит/с/Гц}. \quad (6)$$

Здесь в круглых скобках указана сумма матриц: I_M – единичная матрица размера M , $\mathbf{H} \mathbf{H}^T$ – произведение матрицы канала \mathbf{H} на транспонированную матрицу \mathbf{H}^T , а \det есть детерминант матрицы-суммы, имеющей размеры (NxM) .

Важное отличие выражения (6) от формул (4) и (5) состоит в том, что пропускная способность C_{MIMO} растёт линейно с ростом величины $m = \min(MN)$, тогда как в упомянутых формулах такая зависимость логарифмическая. Это дает основание в последующем условно именовать величину $m = \min(MN)$ как «объем разнесения», т.е. при сравнении и выборе методов отдавать предпочтение методам с наибольшим значением объема m .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа выделены методы повышения помехоустойчивости передачи дискретной информации по каналам радиосвязи. При сравнении и выборе методов отдавать предпочтение методам с наибольшим значением объема m . Дальнейшим направлением исследований может быть моделирование каналов ММО. В простейшем случае (для релейских замираний) моделирование канала связи ММО может состоять в заполнении канальной матрицы \mathbf{H} случайными коэффициентами с нулевым средним и единичной дисперсией. Технология ММО нашла практическое применение в беспроводных локальных сетях стандарта IEEE 802.11n, а также в беспроводных сетях мобильной связи WiMAX и LTE.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Б.; Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1004 с.
- 2 Андронов И.С. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам / И.С. Андронов, Л.М. Финк – М.: Советское радио, 1971. – 408 с.
- 3 Feher K. Wireless digital communications / K. Feher, New Jersey.: Prentice-Hall PTR. 1999. –520 p.
- 4 Foschini G. Layered space – time architecture for wireless communication in a fading environment when using multielement antennas / G. Foschini // Bell Laboratories Technical Journal. – 1996. – Vol. 4, Autumn. – P. 41–59.
- 5 Gesbert D. From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space – Time Coded Wireless Systems / D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P. Smith, A. Naguib // IEEE Journal on selected areas in communications. – 2003. – Vol. SAC-21.– No. 3. – P. 281–302.
- 6 Банкет В.Л. Анализ методов разнесения в системах беспроводной связи / В.Л. Банкет, А.С. Эль-Дакдуки // Труды УНИИРТ.– 2001. – № 3(27). – 15–22 с.
- 7 Banket V.L. Downlink Processing Algorithms for Multi-Antenna Wireless Communications / Banket V.L., Dakdouki A.S., Muckhailov N.K., Skopa A. // IEEE Communications Magazine. – 2005. – No.1. – P.45–48.
- 8 Іщенко М.О. Сигнально-кодові конструкції для систем безпроводового зв'язку з просторово-часовим кодуванням: Дис. ... к.т.н. / ОНАЗ. – Одеса, 2009. – 150 с.
- 9 Слюсар В. Системы ММО: принципы построения и обработка сигналов / Электроника. Наука. Технология. Бизнес – 2005.– № 5.– С. 52–58.
- 10 History of MIMO in radiocommunications. [Электронный ресурс]: History of MIMO in radiocommunications <http://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>.
- 11 Вишне夫斯基 В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишне夫斯基, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
- 12 Вишне夫斯基 В.М. Энциклопедия Wi MAX: Путь к 4G / В.М. Вишне夫斯基, С.Л. Портной, И.В. Шахнович – М.: Техносфера, 2009.– 472 с.
- 13 Банкет В.Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах. / Банкет В.Л – О.: Феникс, 2009. – 180 с.