

**МЕТОДЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО КОДИРОВАНИЯ
ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ**

БАНКЕТ В.Л., НЕЗГАЗИНСКАЯ Н.В., ТОКАРЬ М.С.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

SPACE -TIME CODING METHODS FOR RADUOTELECOMMUNICATION SYSTEMS

BANKET V.L., NEZGAZINSKAJA N.V., TOKAR M.S.

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.*

***Summary.** 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

Последнее десятилетие характеризуется интенсивным развитием систем беспроводной связи (мобильная радиосвязь, системы беспроводного доступа к сети Интернет, компьютерные радиосети внутри зданий и др.). В каналах радиосвязи таких систем действует комплекс помех и искажений. В первую очередь необходимо учитывать влияние многолучевости, причиной которой является наличие отражений на трассе распространения радиоволн. В диапазоне коротких волн действуют многократные отражения от неоднородностей ионосферы. В диапазонах метровых (дециметровых) волн сказываются отражения от зданий, неровностей рельефа (при организации связи на открытой местности), отражения от стен и конструкций (при связи внутри зданий). Сильные замирания сигнала в канале затрудняют оценку переданных сообщений и приводят к искажениям передаваемой информации. О роли замираний сигналов в общей совокупности проблем помехоустойчивости современных телекоммуникационных систем можно судить по доле внимания к каналам с замираниями в популярной монографии Б.Скляра [1, гл.15]. На первых этапах развития радиосвязи единственным методом повышения помехоустойчивости передачи в каналах с замираниями считалось пространственное разнесение приемных антенн. В прежние годы сфера применения разнесенного приема ограничивалась коротковолновой радиосвязью. Здесь использовались хорошо апробированные методы и техника разнесенного приема. Идея разнесенного приема была реализована в 1927 г. для организации радиотелефонной коротковолновой связи. Впервые методы статистической теории связи к разнесенному приему были применены в конце 30-х годов. Потребовалось, однако, еще 15-20 лет для разработки основных теоретических положений статистической теории разнесенного приема [2]. Идея применения разнесения для борьбы с замираниями заключается в совместном использовании на приеме нескольких сигналов, несущих одну и ту же информацию, но пришедших различными путями. Разнесение должно выбираться таким образом, чтобы вероятность одновременных замираний всех используемых сигналов была много меньше, чем какого-либо одного из них. Теоретики и инженеры разработали обширный набор методов объединения («сложения») сигналов из разнесенных каналов с замираниями, сравнение которых приведено в монографии [3]. В теории приема сигналов в условиях замираний устоялось мнение, что радикальным методом борьбы с замираниями

радиосигналов является разнесение приемных антенн и лучшим методом объединения является оптимальное «весовое» сложение по критерию максимума отношения сигнал/шум. Эта комбинация (разнесение/оптимальная обработка на приеме) стала настолько привычной, что к моменту наступления «новой эры» беспроводной связи она оказалась включенной в арсенал средств, предлагаемых в обширном специализированном руководстве по беспроводной связи [3]. Следует упомянуть также о попытках решить проблему помехоустойчивой передачи информации по каналам с замираниями «в обход» традиционных методов разнесения, на базе использования структурных свойств передаваемых сигналов: передача широкополосных сигналов, допускающих разделение лучей на приеме (система *RAKE*[1], например, и др.). Новая эра в теории методов передачи информации по каналам с замираниям наступила с появлением работ, основным девизом которых был революционный призыв: «*Превратим многолучевость из врага в союзника!*». Первые намеки на возможность реализации этой идеи *пространственно-временного кодирования* (ПВК) прозвучали в статье G. Foschini [4]. В ней предлагалось окружить источник многолучевости (среду распространения радиосигналов) множеством передающих и приемных антенн и соответствующим образом организовать передачу и обработку сигналов на приеме. Эта идея была быстро воспринята, многим исследователям пришлось отказаться от старых консервативных взглядов на математическую модель канала радиосвязи. К настоящему времени полный список работ, опубликованных в западной печати [5] по этой тематике содержит 141 статью. В отечественной и зарубежной печати эти революционные подходы были своевременно освещены одним из авторов этого обзора [6,7]. Защищена также кандидатская диссертация [8] по вопросам ПВК. В любых теоретических исследованиях методов передачи информации по специфическим каналам ключевым является вопрос о математической модели канала. Такие экспериментальные исследования свойств каналов были также проведены. Для теории информации, как науки о телекоммуникациях, сегодня оказывается важным то, что фундаментальные положения К. Шеннона о пропускной способности канала оказались применимыми к новым моделям каналов. Более того, по признанию многих авторов, многообещающие результаты анализа пропускной способности новых моделей каналов были стимулом поиска конструктивных методов ПВК для передачи информации по этим каналам. В настоящее время в русскоязычных журналах инженерной направленности можно найти упрощенные пересказы идей ПВК [9], заимствованные из публикаций в сети Интернет [10] или рекламных проспектов. Обширная монография [11] по вопросам широкополосных беспроводных сетей передачи информации ограничивается описанием инженерных решений, но обходит молчанием теоретические проблемы ПВК. По мнению автора монографии [13] передовые эффективные методы передачи информации по каналам с замираниями могут быть представлены и проанализированы как сигнально-кодовые конструкции (СКК), в которых помехоустойчивое кодирование обеспечивает приближение к пропускной способности канала, а сигналы служат для согласования кодека с каналом. Но продуктивные исследования таких СКК должны базироваться на корректном теоретическом материале, который представлен в предшествующих публикациях.

Задача настоящего обзора – классификация и изложение теоретических основ методов пространственно-временного кодирования для систем радиосвязи и разработка на этой основе направлений дальнейших исследований.

1. 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

широполосного лоступа *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, демultipлексором на приеме и приемником максимального правдоподобия на приемной стороне.

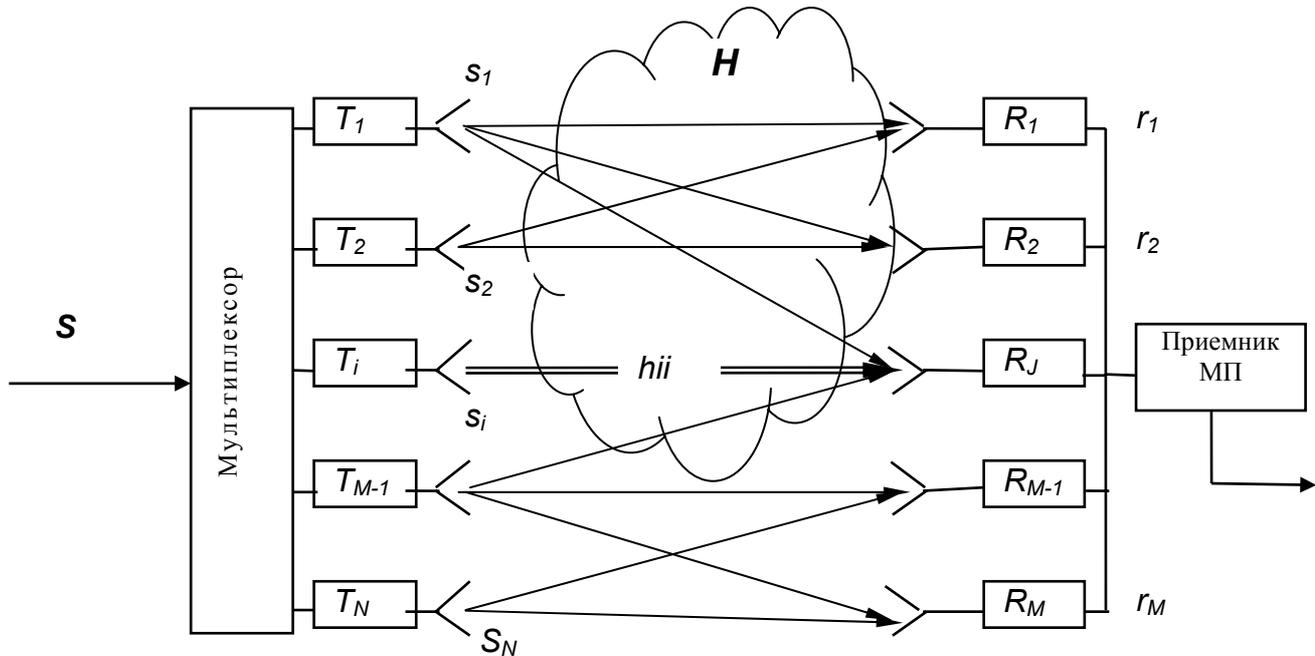


Рисунок 1 – Общая структура системы *MIMO*

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(NxM)* 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

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

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

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

$$r = Hs + n. \quad (2)$$

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 Input-Single 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» (*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» и т.п.). Выбором метода модуляции сигналов-переносчиков решается вопрос о скорости передачи информации в системе в целом.

2. 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 Релевскому либо обобщенному Релевскому распределением. В подавляющем большинстве работ по методам ПВК в каналах *MIMO* непременным 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 многолучевости 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.

3. 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 и M выходов) пропускную способность можно представить так

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

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

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

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]:

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

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} растет 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 . Известно две группы методов ПВК в каналах ММО:

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

4. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РЕШЕТЧАТОЕ КОДИРОВАНИЕ

Метод ПВРК сочетает преимущества методов пространственного разнесения с возможностями исправления ошибок корректирующим кодом при использовании оптимальных алгоритмов декодирования, реализующих одновременно *оптимальный алгоритм объединения разнесенных сигналов*. При традиционном корректирующем кодировании вводится *избыточность во временной области*. В системах с ПВРК вводится *избыточность* и в *пространственной области*, образованной несколькими передающими антеннами и одной приемной антенной (рис.3). При ПВРК возможно получение выигрыша в помехоустойчивости за счет усложнения методов передачи и обработки сигналов на приеме. Для реализации ПВРК выбирают сверточный код со скоростью $R = k/n$. Кодер такого кода генерирует последовательности, образующие кодовую решетку, по которой в процессе декодирования алгоритмом Витерби ведется поиск максимально правдоподобного пути. Символы ветвей такого кодера ($c_1 \dots c_n$) подаются на входы передатчиков. На рис.3 показана модель системы с пространственно-временным решетчатым кодированием, содержащей кодер ПВРК с n выходами, которые подключены к n передающим антеннам. Прием ведется на одну антенну, приемник содержит декодер пространственно-временного кода. Следует отметить, что представлена система типа ММО($n \times 1$), у которой объем разнесения $m = n$.

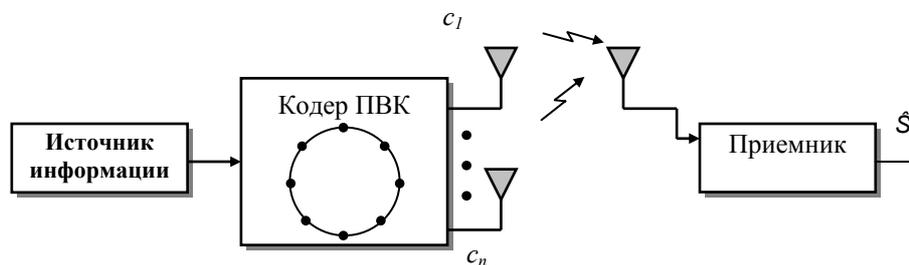


Рис. 3– Модель системы с ПВРК

На рис.4 представлены примеры кодера ПВРК, конфигурации сигнального созвездия восьмипозиционной фазовой модуляции ФМ-8, и решетчатой диаграммы кода. На рис.4-а изображен кодер сверточного кода с единичной памятью [13], двумя выходами ($n=2$) и порождающими многочленами $g_1=5$ и $g_2=1$ (D – символ задержки). Кодирование производится в алфавите алгебраического кольца Z_8 (кольцо целых чисел с операциями сложения и умножения по модулю 8). При синтезе такой сигнально-кодовой конструкции широко используется изоморфизм между символами алгебраического кольца Z_8 и сигналами фазовой модуляции ФМ-8 [13]. Выходы кодера c_1 и c_2 подключены к соответствующим входам передатчиков разнесенных передающих антенн. С целью повышения удельной скорости передачи информации в приведенном примере используется фазовая модуляция ФМ-8. Один шаг решетчатой диаграммы ПВРК (рис. 4-в) содержит наборы предыдущих и последующих состояний кодера ($1 \dots 7$) и соединяющих их ветвей.

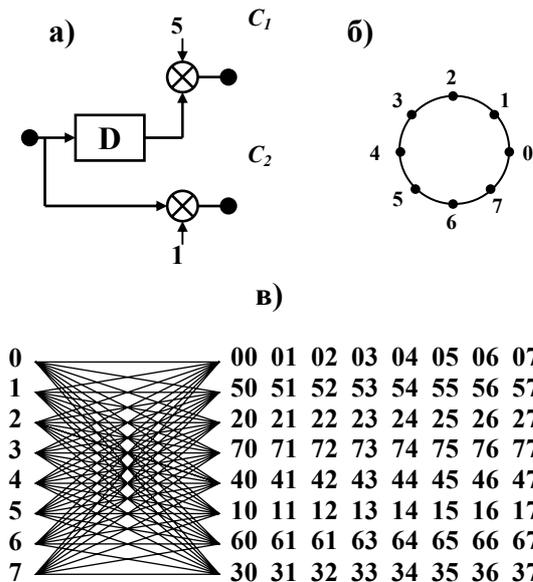


Рисунок 4– Кодер (а), сигнальное созвездие (б) и решетчатая диаграмма ПВРК (в).

Каждая ветвь маркируется парой символов на выходе кодера c_1c_2 . В правой части диаграммы показаны строки с парами символов, маркирующими ветви, выходящие из конкретного состояния в порядке их перечисления сверху вниз. К примеру, пара символов $(c_1c_2) = (52)$, расположенная во второй строке на третьем месте слева маркирует ветвь, соединяющую предыдущее состояние «1» с последующим состоянием «3». Обработка сигналов на приеме производится путем декодирования по решетке ПВРК на основе алгоритма Витерби [13]. В работе [16] опубликованы данные о сверточных кодах для ПВРК. Наиболее типичные примеры кодов даны в табл. 1. Варианты кодов в таблице пронумерованы, указан также метод модуляции ФМ- M (M -число позиций фаз

сигнала, $M = 4$ и 8). Отмечена удельная скорость $R_{ПВРК}$. Более полные сведения о кодах содержатся в диссертации [8].

Таблица 1 – Характеристики ПВРК

№	Метод модуляции	$R_{ПВРК}$, бит/изм.	E_b/N_0 , дБ
1	ФМ-4	1/2	22.0
2	ФМ-8	3/4	26.0

Помехоустойчивость декодирования ПВРК по алгоритму Витерби определяют величиной отношения энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 , необходимого для обеспечения типичного для цифровых систем значения вероятности ошибки $P_o=10^{-5}$. Результирующий энергетический выигрыш (по сравнению с некодированной передачей), обеспечиваемый применением кода №1 с двумя передающими антеннами определяется суммой $\Theta = \theta_k + \theta_p = 17$ дБ (где $\theta_k = 15$ дБ – выигрыш за счет сверточного кодирования, $\theta_p = 2$ дБ – выигрыш за счет использования двух разнесенных передающих антенн). Несмотря на наличие весомого ЭВК следует отметить недостаток метода ПВРК: наличие относительно малого выигрыша (2 дБ) за счет разнесения, что объясняется малым значением объема разнесения $m=n=2$. Увеличение величины m возможно только за счет снижения скорости кода (т.е. увеличения n).

5. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ БЛОКОВОЕ КОДИРОВАНИЕ

Принцип пространственно-временного блочного кодирования рассмотрим на примере, структура которого показана на рис.5. По существу, представлена система кодирования в канале $MIMO (2 \times 1)$. Схема содержит две передающих антенны и одну приемную антенну. В соответствии предложением автора метода ПВБК *S.Alamouti* [17] входной поток передаваемых символов c разбивается на пары $[c_1 c_2]$, причем, на первом полутаковом интервале символ c_1 передается через антенну T_1 и символ c_2 передается через антенну T_2 . На втором полутаковом интервале порядок передачи изменяется: через антенну T_1 передается инверсия символа c_2 (на рисунке обозначен как $(-c_2^*)$), а символ c_1 передается через антенну T_2 (на рисунке обозначен как (c_1^*)). Правило расположения символов c в виде матрицы в структуре кодера на рис.5 и есть блочный код *Alamouti*.

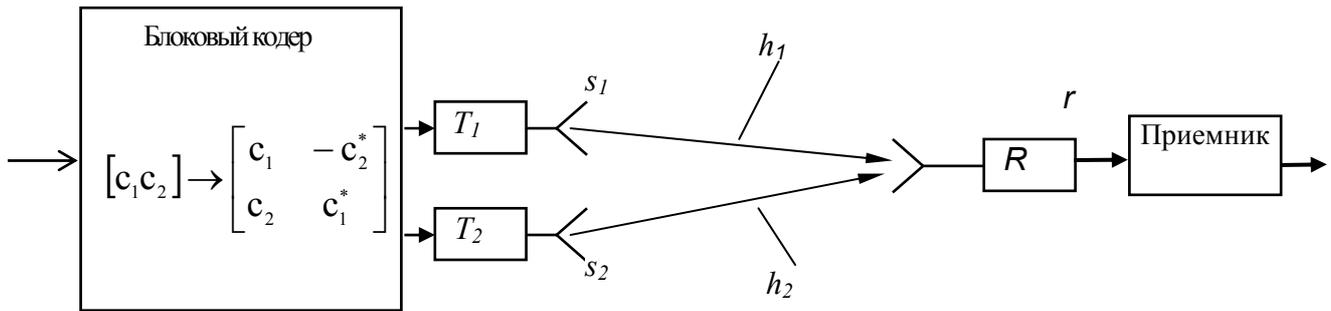


Рисунок 5 – Блоковое кодирование в канале $MIMO(2 \times 1)$.

Предполагается, что коэффициенты передачи канала на соседних интервалах остаются неизменными. Тогда результаты приема кодированных таким образом символов на соседних интервалах можно представить так

$$r_1 = h_1 c_1 + h_2 c_2 + n_1, r_2 = -h_1 c_2^* + h_2 c_1^* + n_2, \quad (7)$$

где n_1 и n_2 – независимые отсчеты аддитивного шума на входе приемника. Следуя общему матричному выражению (2), представим передаваемые и принятые сигналы в векторной форме: $\mathbf{c} = [c_1 \ c_2]^T, \mathbf{r} = [r_1 \ r_2]^T, \mathbf{n} = [n_1 \ n_2]^T$.

Тогда уравнение (2), соответствующее равенствам (7), может быть представлено в матричной форме так

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (8)$$

где матрица \mathbf{H} определяется так:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

Вектор \mathbf{n} есть гауссовский случайный вектор с нулевым средним и дисперсией N_0 . Полагая, что все возможные пары сигналов выбираются для передачи равновероятно из множества \mathcal{C} , максимально правдоподобную оценку переданных сигналов можно определить по правилу:

$$\hat{\mathbf{c}} = \arg \min_{\mathbf{c} \in \mathcal{C}} \|\mathbf{r} - \mathbf{H}\mathbf{c}\|^2. \quad (10)$$

Это правило декодирования может быть упрощено далее, с учетом предположения, что матрица канала \mathbf{H} известна и относится к классу ортогональных матриц, для которой выполняется условие $\mathbf{H}\mathbf{H}^T = \rho \mathbf{I}_2$, где $\rho = |h_1|^2 + |h_2|^2$, а \mathbf{I}_2 – единичная матрица размера 2×2 . образуем модифицированный вектор принимаемого сигнала $\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{H}^T \mathbf{r} = \rho \mathbf{c} + \tilde{\mathbf{n}}$, где модифицированный вектор шума $\tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{H}^T \mathbf{n}$. Тогда правило декодирования (8) будет иметь вид

$$\hat{\mathbf{c}} = \arg \min_{\mathbf{c} \in \mathcal{C}} \|\tilde{\mathbf{r}} - \rho \mathbf{c}\|^2. \quad (11)$$

Ортогональные свойства кода приводят к тому, что отношение сигнал / шум при вынесении решений по алгоритмам (10) и (11) возрастает до величины $ОСШ = \frac{\rho E_c}{N_0}$. Эта формула

свидетельствует о накоплении энергии сигнала в ρ раз за счет пространственного разнесения. Рассмотренный пример может быть обобщен на большую величину объема

разнесения. Теоретически задача поиска оптимальных пространственно-временных блоковых кодов сводится к использованию ортогональных матриц подходящих форматов. Сразу после публикации *S.Alamouti* [17] высказывались сомнения осуществлении таких матриц. Однако в работе [18] опубликованы сведения о существовании таких матриц в форме т.н. ортогональных проектов (*Orthogonal Designs*) с форматами (2x2), (4x4) и (8x8), которые обеспечивают широкий диапазон объемов разнесения. К примеру, ортогональная матрица ПВБК размером (4x8) имеет вид:

$$\begin{pmatrix} c_1 & -c_2 & -c_3 & -c_4 & c_1^* & -c_2^* & -c_3^* & -c_4^* \\ c_2 & c_1 & c_4 & -c_3 & c_2^* & c_1^* & c_4^* & -c_3^* \\ c_3 & -c_4 & c_1 & c_2 & c_3^* & -c_4^* & c_1^* & c_2^* \\ c_4 & c_3 & -c_2 & c_1 & c_4^* & c_3^* & -c_2^* & c_1^* \end{pmatrix} \quad (12)$$

Поскольку в каждой строке содержится 8 символов, из которых 4 есть «информационные» символы, нетрудно определить, что скорость такого ПВБК составляет 4/8 (т.е. $R_{\text{ПВБК}}=1/2$). Последовательность перечисления символов в столбцах определяет закон передачи символов во времени, а закон передачи символов со знаком (*) в строках определяет правило их распределения в пространстве. Размер кодовой матрицы (4x8) соответствует величине объема разнесения $m=\min(MN)=4 \times 8=32$. По данным моделирования [5] такой ПВБК обеспечивает энергетический выигрыш 3дБ в канале с Релеевскими замираниями. Следует отметить, что несмотря на многочисленные утверждения в цитируемых статьях [5,14,18,19] о простоте алгоритмов декодирования (8) и (9), эти алгоритмы являются переборными, т.е. достаточно сложными. Кроме этого, в этих же работах не учитывается снижение помехоустойчивости за счет влияния шумов канала в процессе приема обучающей последовательности В то же время, имеются идеи формирования таких ПВБК, эффективное декодирование которых не требует никаких сведений о состоянии ММО канала на приемной и передающей сторонах одновременно [20].

6. ПРИМЕНЕНИЕ ПВК В СИСТЕМАХ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

С первых публикаций сущности и особенностей пространственно-временного кодирования разработчики методов передачи информации по каналам с замираниями активно взяли методы ПВК на вооружение. Производителей оборудования для систем беспроводного доступа привлекали следующие преимущества ПВК:

1. Сигналы-переносчики при пространственно-временном кодировании, в отличие от широкополосных сигналов, не требуют значительного расширения полосы частот при условии равной помехоустойчивости. Для операторов систем беспроводной связи это преимущество является решающим в условиях возрастающих запросов на услуги беспроводной связи, острого дефицита спектра и роста стоимости полос частот, выделяемых для систем беспроводной связи.

2. Универсальность и гибкость методов ПВК, предлагающих, по мнению ведущего теоретика *R. Calderbank* [20], лучшие возможности обмена энергетической эффективности на частотную эффективность в многолучевых каналах.

3. Возможность сочетания методов ПВК совместно с высокоскоростными сигналами цифровой модуляции (многопозиционные ФМ и АФМ), обеспечивающими высокие показатели частотной эффективности.

4. Возможность дальнейшего повышения помехоустойчивости систем с ПВК при введении адаптивного регулирования уровней передаваемых сигналов (адаптация к условиям многолучевости путем управления передающей стороной по обратному каналу).

5. Возможность встраивания пространственно-временных конструкций в структуру сигналов в многопользовательских сетях.

Внедрение методов ПВК происходило типовым путем:

- Включение методов ПВК в стандарты серии *IEEE* (*IEEE* 802.11 и *IEEE* 802.16 [12]).
- Разработка и выпуск специализированных интегральных микросхем для систем ПВК-ММО [9] и последующее их внедрение в реальное оборудование. По прогнозам [12] число пользователей беспроводного широкополосного доступа в мире к 2015 году достигнет 2,1 млрд. Такая перспектива роста рынка привлекает операторов и инвесторов. Сложность алгоритмов и аппаратного обеспечения ПВК не пугает производителей оборудования. В России услуги широкополосного доступа на основе этих стандартов предлагает ряд компаний [12].

7. НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Пространственно-временное кодирование удачно сочетает преимущества методов пространственного разнесения с возможностями исправления ошибок корректирующим кодом при использовании оптимальных алгоритмов декодирования, реализующих одновременно оптимальный алгоритм объединения разнесенных сигналов. Эффективность исследований и разработок новых методов ПВК для перспективных радиосистем в значительной мере зависит от того, насколько используемые модели каналов соответствуют реальным условиям. В статистической теории связи широко и продуктивно используются методы теории информации. Пространственно-временные блочные коды обеспечивают большую величину выигрыша от разнесения за счет возможности обеспечения значительного объема разнесения. Пространственно-временные решетчатые коды обеспечивают в каналах с замираниями значительный энергетический выигрыш за счет кодирования, но небольшой выигрыш за счет разнесения из-за малого объема разнесения. Дальнейшее повышение помехоустойчивости решетчатых ПВК возможно при использовании в качестве формирователей решетки кодеров СК из нового перспективного класса рекурсивных сверточных кодов [12]. Представляется перспективным метод синтеза сверточно-блочных сигнально-кодовых конструкций с использованием внутренних сигналов из класса ПВБК и внешних СК. Учитывая актуальность разработки помехоустойчивых методов передачи цифровой информации по каналам с замираниями целесообразно провести исследования в следующих направлениях:

1.1. На основе опубликованных данных об экспериментальных исследованиях каналов беспроводной связи уточнить математическую модель канала для систем с ПВК.

1.2. Продолжить исследования методов формирования ПВБК и эффективности их декодирования в каналах с замираниями.

1.3. Выполнить поиск и синтез порождающих многочленов рекурсивных СК по критериям эффективности для использования в составе ПВБК.

1.4. Разработать методику синтеза сверточно-блочных сигнально-кодовых конструкций для каналов с замираниями с использованием внутренних сигналов из класса ПВБК и внешних СК

1.5. Исследовать возможности применения идей дифференциального кодирования к синтезу методов передачи информации по квазистационарным каналам беспроводного доступа.

Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1004 с.
2. Андронов И.С. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам / Андронов И.С., Финк Л.М. / М.: Советское радио. 1971. – 408 с.
3. Feher K. Wireless digital communications / New Jersey.: Prentice-Hall PTR. 1999. – 520p.
4. Foschini G. Layered space – time architecture for wireless communication in a fading environment when using multielement antennas // 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 / Gesbert D., Shafi M., Shiu D., Smith P., Naguib A. // 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 / Банкет В.Л., Эль-Дакдуки А. С. // 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., Myekhaïlov 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: Автореф. дис. ... к.т.н. / ОНАЗ.- Одеса, 2009. – 150 с.
9. Слюсар В. Системы МИМО: принципы построения и обработка сигналов / Электроника. Наука. Технология. Бизнес – 2005.– №5.– С. 52-58.
10. History of MIMO in radiocommunications. – <http://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>.
11. Вишнеvский В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации; Вишнеvский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
12. Вишнеvский В.М. Энциклопедия Wi MAX: Путь к 4G / Вишнеvский В.М., Портной С. Л., Шахнович И.В.; – М.: Техносфера, 2009.– 472 с.
13. Банкет В.Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах. - О.: Феникс, 2009.– 180 с.
14. Erceg V. Channel models for fixed wireless applications // IEEE Tech.Report, IEEE 802.16 Work Group, 2001.
15. Wang D. Super - Orthogonal Differential Trellis Coding and Decoding / Wang D., Xia X.; IEEE Journal on Selected Areas in Communications – 2003 – Vol. 23, No.9.–P.1768-1798.
16. Calderbank A. R. Space-Time Codes for High Data rate Wireless Communication: Performance Criterion and Code Construction / Calderbank A. R Tarokh V., Seshadri N.; IEEE Trans. on Inform. Theory.– 1998.– Vol. 44.– No. 2.– P. 744 – 765.
17. Alamouti S. M. A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications / IEEE J. Select. Areas Communication. –Vol. 16. No. 8.– 1998.– P. 1451 - 1458.
18. Calderbank A.R. Space-Time Block Coding from Orthogonal Designs / Calderbank A.R Tarokh V., Jafarkhani H.; IEEE Trans. on Inform. Theory.– 1999.– Vol. 45.– No. 5.– P. 1456 – 1467.
19. Hohnwald B. Systematic Design of Unitary Space - Time Constellations / HohnwaldB., Marzetta T. IEEE Trans. on Inform. Theory.– 2000. – Vol. 46. – No. 6.– P.– 1962 - 1973.
20. Calderbank R. Space - time coding and signal processing for high data rate wireless communications / Calderbank R., Naguib A. Wireless; Communications and Mobile Computing.– 2001.– No.1.–P.13-34.