

УДК 621.39

В.А. Кологривов

Модельное исследование многоантенной технологии

Разработана функциональная модель многоантенной технологии передачи данных. Выполнено исследование влияния степени статистической зависимости передаваемых антеннами символов на помехоустойчивость системы передачи в условиях многолучевого распространения и федингов каналов передачи. Выявлены перспективные варианты формирования символов, передаваемых антеннами, с точки зрения минимизации вероятности появления ошибок передачи.

Ключевые слова: многолучевое распространение, фединг канала, пространственно-временное кодирование, технологии SISO, MISO, SIMO, MIMO.

Постановка задачи исследования. Современные стандарты беспроводной передачи WiFi, WiMAX, LTE, использующие многоантенные технологии и пространственного кодирования, обеспечили недостижимые ранее помехоустойчивость и скорости передачи информации в условиях городских многоэтажных застроек, закрытых трасс и замкнутых офисных помещений. В то же время требования, предъявляемые к беспроводным системам передачи, постоянно ужесточаются, что побуждает совершенствовать используемые технологии и выявлять имеющиеся резервы. В связи с этим целесообразно детальное исследование механизмов функционирования многоантенных технологий и поиск возможных направлений развития.

Одним из ключевых направлений многоантенных технологий является обеспечение статистической независимости потоков символов, передаваемых разными антеннами, что облегчает разделение потоков в приемниках, снижает вероятность появления ошибок либо позволяет повысить скорость передачи.

Для проведения подобных исследований была разработана упрощенная функциональная модель многоантенной системы передачи данных, изображенная на рис. 1.

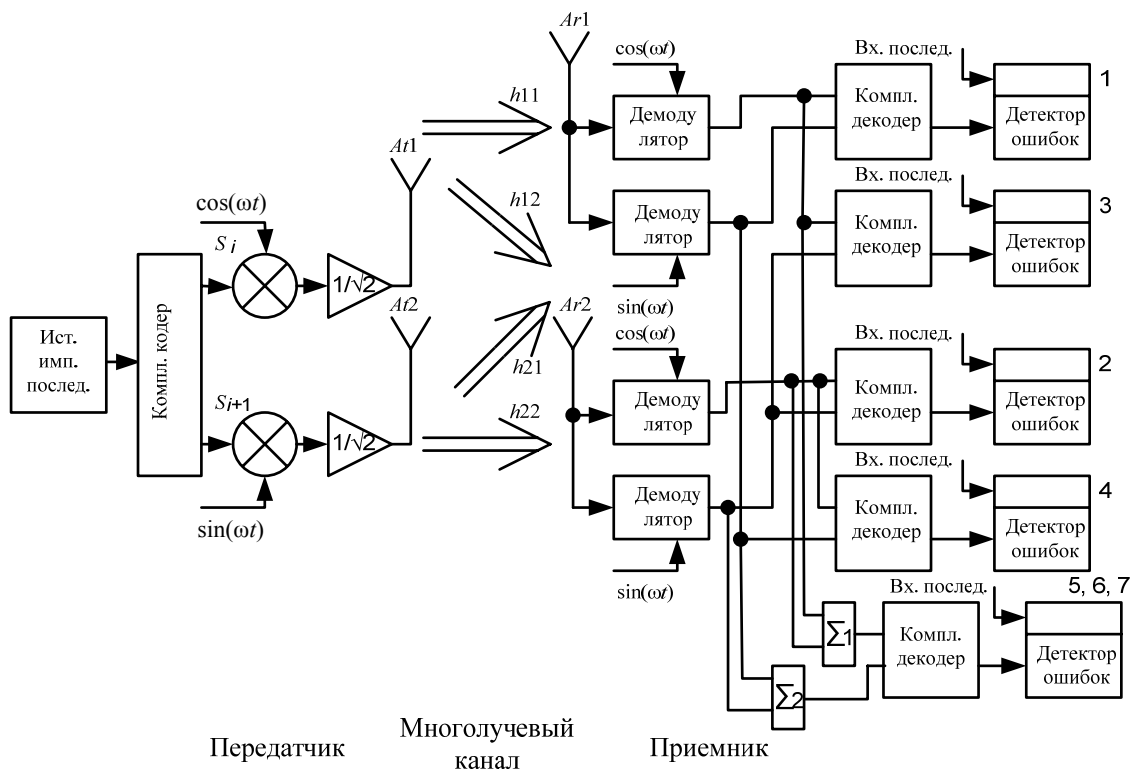


Рис. 1. Функциональная модель многоантенной системы передачи данных

Описание функциональной модели. Многоантенные технологии, представленные в работах [1, 2], посвящены описанию алгоритмов передачи, приема и обработки сигналов по схеме Аламути. При всех достоинствах алгоритмического описания в тени остаются механизмы взаимодействия в приемнике символьных потоков с разных передающих антенн и причины, обусловившие выбор данной схемы. Для раскрытия механизмов взаимодействия в приемниках символьных потоков, пришедших с разных передающих антенн, и выбора перспективных вариантов (схем) формирования символов из битового потока данных предлагается использовать упрощенную функциональную модель многоантенной технологии (см. рис. 1), которая позволяла бы достичь поставленных целей.

В основу модели положена многоантенная технология (2×2) – две передающие – $At1, At2$ и две приемные – $Ar1, Ar2$ антенны. Пространственное разнесение передающих и приемных антенн моделируется статистически независимыми федингами и шумами каналов передачи с коэффициентами $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$. Моделирование производится в относительных масштабах времени и частоты.

Передающая часть системы представлена источником сигнала в виде псевдослучайной бинарной импульсной последовательности. Комплексный кодер представляет текущий дибит последовательности комплексными символами S_i, S_{i+1} для антенн $At1, At2$. Варианты представления комплексных символов из дибита соответствуют понятиям о «подобных», «ортогональных» и «антиподных» сигналах и представлены далее при обсуждении результатов модельного эксперимента. Далее производится BPSK-модуляция сформированными символьными потоками ортогональных несущих колебаний одной частоты $\cos(\omega t)$ и $\sin(\omega t)$. Заметим, что комплексный символ длиной в дибит обеспечивает снижение полосы спектра частот вдвое. Масштабные множители $1/\sqrt{2}$ призваны обеспечить суммарную мощность, излучаемую двумя антеннами $At1, At2$, равную мощности, излучаемой при одноантенной технологии (прототипе).

Фазовое разделение каналов при использовании в передатчиках опорных генераторов одной частоты разнесенных по фазе на $\pi/2$ радиан ($\cos(\omega t)$ и $\sin(\omega t)$) и относительной фазовой манипуляции предполагает применение на приемной стороне для разделения каналов схемы восстановления несущей частоты и фазовых детекторов с опорными генераторами этой частоты, разнесенными по фазе на $\pi/2$ радиан.

Модель многолучевого канала передачи включает в себя четыре эквивалентных канала между передающими и приемными антеннами с коэффициентами $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$. Фединги и шумы эквивалентных каналов статистически квазинезависимы, что обеспечивается использованием разных генераторов псевдослучайных последовательностей. Моделирование федингов каналов передач обеспечивается добавлением к основному (невозмущенному) каналу произведения передаваемой символьной последовательности и медленной псевдослучайной последовательности с дисперсией σ_F . Шаг медленной псевдослучайной последовательности определяет минимальное время замираний, а дисперсия – глубину замираний. Предусмотрена возможность моделирования как комплексных, так и действительных федингов каналов передач. Широкополосные шумы канала моделируются быстрыми псевдослучайными последовательностями с дисперсиями σ_N , добавляемыми в канал. Шаг быстрой псевдослучайной последовательности определяет ширину спектра шумов, а дисперсия – мощность шума. Изменение задержек по каналам распространения не моделируется.

Приемная часть системы представлена двумя приемными антеннами $Ar1, Ar2$ и приемниками. Каждый приемник включает в себя демодуляторы сигналов, пришедших с разных передающих антенн и подверженных влиянию федингов и шумов каналов передач. На вторые входы демодуляторов подаются опорные колебания несущей частоты $\cos(\omega t)$ и $\sin(\omega t)$, синхронизированные с точностью до фазы с колебаниями генераторов передающей стороны. Демодулятор включает в себя множитель принимаемой смеси сигналов с колебанием опорного генератора и фильтр нижних частот (ФНЧ), выделяющий информационную составляющую. Особенностью демодуляторов в данном случае является выделение комплексного модулирующего сигнала. Кроме того, для обеспечения последующего декодирования принятых комплексных символов выделенные демодулятором сигналы подвергаются «нормализации» – восстановлению формы и амплитуды принятых символов. Комплексные декодеры восстанавливают (возможно, с ошибками) по принятым комплексным символам исходные биты входной биполярной последовательности. Детектор ошибок, сравнивая исходную

битовую последовательность с принятой, отображает число битовых ошибок. Отношение числа обнаруженных битовых ошибок к длине переданной последовательности, т.е. частоту появления ошибки при большом числе испытаний (большой длине битовой последовательности), принимаем за приближенное значение вероятности битовой ошибки P_{err} .

Условия модельного эксперимента. Заметим, что модель (см. рис. 1) построена так, что обеспечивает исследование технологий MISO, MIMO и SIMO. Так, на детекторах 1 и 2, когда декодируются символы одного из приемников, будем наблюдать результаты передачи и приема по технологии MISO – две передающие антенны, одна приемная. В таблицу испытаний результаты занесены в строки 1 и 2.

Детекторы 3 и 4 и соответствующие им декодеры добавлены в функциональную модель специально для исследования механизма взаимодействия потоков символов, переданных разными антеннами, но принимаемых одной антенной. В данном случае на декодер подаются символы с демодуляторов разных приемников. Так, декодер 3 символ, передаваемый антенной 1, снимает с демодулятора первого приемника, а символ, передаваемый антенной 2, снимает с демодулятора второго приемника. Декодер 2, наоборот, символ, передаваемый антенной 1, снимает с демодулятора второго приемника, а символ, передаваемый антенной 2, снимает с демодулятора первого приемника. В таблицу испытаний результаты занесены в строки 3 и 4.

На выходе 5 будем наблюдать результаты передачи и приема по технологии MIMO. В данном случае на входе декодера суммируются символы, принимаемые первым и вторым приемниками. В таблице испытаний результаты занесены в строку 5.

На выходах 6, 7 (совпадающих с выходом 5) будем наблюдать результаты передачи и приема по технологии SIMO при условии отключения одной из передающих антенн и соответствующего сумматора на входе декодера. Кроме того, масштабные множители (усилители) перед передающими антеннами принимают значения 1 вместо $1/\sqrt{2}$. При отключении по очереди антенн 1 и 2 и соответствующих сумматоров на входе декодера в таблицу испытаний результаты занесены в строки 6 и 7.

Для сравнительного анализа результаты испытаний технологии прототипа (по одноантенной технологии – обычный BPSK-модем) занесены в таблицу испытаний строкой 8.

Мощность сигнала, излучаемого при одноантенной технологии (например, системы BPSK) соответствует суммарной мощности, излучаемой антеннами при технологиях MISO и MIMO. При исследовании технологии SIMO излучаемая антенной мощность удваивается и совпадает с таковой при одноантенной технологии.

Модельное исследование многоантенной технологии проводилось при значениях дисперсий федингов $\sigma_F = \{1/8, 1/4, 1/2\}$ и шумов каналов передач $\sigma_N = \{1/8, 1/4, 1/2\}$. Мощности комплексных радиосигналов на выходах модуляторов передатчиков (перед масштабными множителями) равны $P_S = 1$. Максимальная длина входной псевдослучайной биполярной последовательности выбрана равной 10^4 битов из-за приемлемого времени вычислений, хотя для достижения заметного спада «водопадоподобных характеристик» необходима длина последовательности не менее 10^5 битов. Для прояснения механизмов взаимодействия разных символьных потоков в демодуляторах приемников модельное исследование проводилось как при действительных, так и комплексных федингах каналов передач. Результаты модельных исследований сведены в таблицы, столбцы которых соответствуют вариантам формирования символов передающих антенн, а строки – реализуемым технологиям приема и обработки. В данной работе решено было ограничиться двумя таблицами модельных исследований для $\sigma_F = 1/8$, $\sigma_N = 1/2$ при действительных и комплексных федингах каналов (см. табл. 1 и 2).

Результаты модельных исследований и пояснения. Приведем таблицу модельных исследований многоантенных технологий при действительных федингах $\sigma_F = 1/8$ и шумах каналов передач $\sigma_N = 1/2$. Для удобства введены обозначения: элементов дибита – $x_1 = b_i$, $x_2 = b_{i+1}$; символов передающих антенн $At1$, $At2$ – $y_1 = S_i$, $y_2 = S_{i+1}$.

Анализ результатов исследований при действительных федингах каналов показывает:

а) результаты первого и второго вариантов формирования символов (столбцы 1 и 2) полностью совпадают. Это обусловлено тем, что вещественные части символов одинаковы и коррелированы. Фединги и шумы каналов – действительные, поэтому мнимые части символов не взаимодействуют с ними и не оказывают влияния на вероятность ошибок.

Таблица 1

**Вероятности битовых ошибок многоантенных технологий
при действительных федингах каналов**

P_{err} при $\sigma_F=1/8$, $\sigma_N=1/2$, $y_1=x_1+ix_2$ и заданных вариантах формирования y_2						
$y_2=x_1+ix_2$	$y_2=x_1-ix_2$	$y_2=-x_2+ix_1$	$y_2=x_2+ix_1$	$y_2=-x_1-ix_2$	$y_2=-x_1+ix_2$	№ detect
0,0017	0,0017	0,0003	0,0002	0,0002	0,0001	1
0,0011	0,0011	0,0005	0,0004	0,0002	0,0001	2
0,0003	0,0003	0,0004	0,0005	0,0008	0,0008	3
0,0008	0,0008	0,0006	0,0005	0,0012	0,0012	4
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5
0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0002	0,0002	6
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	7
0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	8

Таблица 2

**Вероятности битовых ошибок многоантенных технологий
при комплексных федингах каналов**

P_{err} при $\sigma_F=1/8$, $\sigma_N=1/2$, $y_1=x_1+ix_2$ и заданных вариантах формирования y_2						
$y_2=x_1+ix_2$	$y_2=x_1-ix_2$	$y_2=-x_2+ix_1$	$y_2=x_2+ix_1$	$y_2=-x_1-ix_2$	$y_2=-x_1+ix_2$	№ detect
0,0014	0,0020	0,0005	0,0003	0,0001	0,0002	1
0,0015	0,0018	0,0003	0,0004	0,0001	0,0003	2
0,0004	0,0005	0,0002	0,0008	0,0006	0,0006	3
0,0010	0,0008	0,0006	0,0004	0,0009	0,0008	4
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	5
0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	6
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	7
0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	8

Кроме того, вероятности ошибок на выходах 1 и 2 (технология MISO) заметно выше, чем на выходах 3 и 4. Это обусловлено тем, что символы, передаваемые антеннами, сильно коррелируют, что препятствует их безошибочному разделению в приемных трактах. Уменьшение вероятности ошибок на выходах 3 и 4 обусловлено тем, что символы, принятые разными приемниками, частично декоррелированы шумами каналов;

б) результаты пятого и шестого вариантов формирования символов (столбцы 5 и 6) также полностью совпадают. Это обусловлено тем, что действительные части символов, передаваемых антеннами, антикоррелированы, поэтому легче безошибочно разделяются в приемных трактах (выходы 1 и 2, технология MISO). Увеличение вероятности ошибок на выходах 3 и 4 обусловлено тем, что символы, принятые разными приемниками, оказываются частично коррелированными шумами каналов, и вероятность ошибок возрастает;

в) третий и четвертый варианты построения символов (столбцы 3 и 4) отличаются тем, что биты в символах переставлены местами, что делает действительные части символов ортогональными и слабо коррелированными. Изменение знака в такой ситуации также не оказывает сильного влияния на степень корреляции. В связи с этим вероятность ошибок на выходах 1, 2 (технология MISO) оказывается средней. Увеличение вероятности ошибок на выходах 3, 4 объясняется тем, что сигналы, принятые разными антеннами, оказываются более коррелированными за счет воздействия шумов каналов;

г) суммирование принятых символов с приемников первой и второй антенн позволяет существенно уменьшить вероятность ошибок передачи (выход 5, технология MIMO), поскольку вероятность одновременного возникновения глубоких замираний во всех независимых каналах в этом случае более низкая, чем в MISO. Влияние корреляции передаваемых символов на вероятности

ошибок передачи и приема сказывается и в данном случае (что при заданной длине последовательности не видно из численного эксперимента);

д) отключение одной из передающих антенн приводит к тому, что выходы 6 и 7 соответствуют технологии SIMO. Анализ показывает, что вероятность ошибок в данном случае оказывается меньше, чем при MISO. Это объясняется тем, что сигнал излучается одной передающей антенной и влияние взаимной корреляции символов на процесс их разделения в приемниках отсутствует. Кроме того, следует учесть, что мощность, излучаемая одной антенной, при этом удваивается;

е) сравнивая технологии MIMO, MISO, SIMO с технологией SISO, видим, что лучшей помехоустойчивостью обладает MIMO, далее следует SIMO, а затем MISO.

Анализ результатов исследований при комплексных федингах каналов показывает:

а) все варианты формирования передаваемых символов стали различными по вероятностям возникновения ошибок (технология MISO) поскольку фединги каналов передач стали комплексными;

б) сохранились различия по вероятностям возникновения ошибок на основных (1 и 2) и вспомогательных (3 и 4) выходах, связанные с сильной корреляцией, слабой корреляцией, сильной антикорреляцией и частичной декорреляцией или корреляцией за счет шумов каналов (технология MISO);

в) обработка передаваемых символов при передаче и приеме двумя антеннами (2×2) (по технологии MIMO) дает лучший результат по вероятности возникновения ошибок передачи, чем по технологиям MISO и SIMO;

г) обработка передаваемых символов при передаче одной антенной и приемом на две антенны (технология SIMO), как и прежде, имеет меньшую вероятность возникновения ошибок, чем по технологии MISO;

д) как и прежде, сравнивая технологии MIMO, MISO, SIMO с технологией SISO, видим, что лучшей помехоустойчивостью обладает MIMO, далее следует SIMO, а затем MISO.

Заключение. Таким образом, в работе предложена достаточно простая и эффективная функциональная модель многоантенной системы пространственно-временного кодирования передаваемой информации, позволяющая исследовать механизмы влияния статистической зависимости передаваемых символов на вероятность возникновения ошибок передачи.

Исследованные варианты формирования передаваемых символов позволили детализировать механизмы влияния степени взаимной корреляции передаваемых символов на вероятность возникновения ошибок передачи. В частности, результаты исследований подтвердили известный тезис о влиянии взаимной корреляции потоков символов на их различимость.

Худшей помехоустойчивостью обладают системы с положительно коррелированными символами, излучаемыми разными антеннами. Лучшей помехоустойчивостью обладают системы с отрицательно коррелированными (антикоррелированными) символами разных антенн. Символы, образованные перестановкой бит, имеют минимальную корреляцию и позволяют реализовать среднее значение вероятности ошибок передачи. Минимальная корреляция символов, полученная перестановкой в них бит, взятых из псевдослучайной биполярной тестовой последовательности, соответствует случаю независимых (псевдоортогональных) символов. На практике с целью возможности организации ортогональных символов исходную последовательность отображают на комплексную плоскость. В статье отображение производится путем представления текущего дибита комплексным символом (комплексный кодер). Для сравнения, в схеме Аламоути [1, 2] биты в зависимости от знака представляются комплексными числами, из которых затем строятся символы.

Перспективными вариантами формирования передаваемых антеннами символов являются варианты 3–6, имеющим признаки «ортогональных» и «антиподных» сигналов. Кроме того, описанный метод комплексного кодирования текущего дибита позволяет вдвое повысить спектральную эффективность.

Влияние шумов канала сводится к декорреляции сильно коррелированных символов или, наоборот, к появлению корреляции между передаваемыми независимыми ортогональными символами.

В целом многоантенные технологии позволяют получить выигрыш по помехоустойчивости из-за того, что одновременные замирания сигнала в пространственно разнесенных каналах маловероятны. Выигрыш по помехоустойчивости можно обратить либо в увеличение скорости передачи, либо уменьшение мощности излучаемого сигнала, либо увеличение дальности передачи.

Литература

1. Гепко И.А. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития / И.А. Гепко, В.Ф. Олейник, Ю.Д. Чайка, А.В. Бондаренко / под ред. В.Ф. Олейника. – К.: ЕКМО, 2009. – 672 с.
2. Сюваткин В.С. WiMAX-технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение / В.С. Сюваткин, В.И. Есипенко, И.П. Ковалев, В.Г. Сухоробров / под ред. В.В. Крылова. – М.: БХВ-Петербург, 2005. – 368 с.

Кологривов Василий Андреевич

Доцент каф. средств радиосвязи ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-37-09

Эл. почта: mrc@main.tusur.ru

Kologrivov V.A.

Model research of multi-antenna technology

The functional model of multi-antenna technology of data transmission is developed. The paper describes the influence of statistical dependence degree of the symbols transmitted by antenna to a noise stability of transfer system in the conditions of multi-beam distribution and fading of transmitting channels. The study reveals the perspective options in formation of symbols transmitted by antennas from the point of view of minimization of error probability in transmitting.

Keywords: multi-beam distribution, channel fading, existential coding, SISO, MISO, SIMO, MIMO technologies.