

Petrov Boris Mihaylovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: airpu@tsure.ru; GSP 17A, 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; the department of antennas and radio transmitters; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.327.12

В.П. Федосов

**АЛГОРИТМЫ СОВМЕСТНОЙ АДАПТАЦИИ НА ПРИЕМ И ПЕРЕДАЧУ
В СИСТЕМЕ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ПРИ
НАЛИЧИИ АКТИВНЫХ ПОМЕХ**

Представлены результаты разработки и исследований адаптивных алгоритмов в MIMO-системе связи (multiple-input multiple-output) как на передающем, так и на приемном концах линии беспроводного доступа на основе антенных решеток при наличии активной помехи как от аналогичной системы MIMO, так и от системы SISO (single-input single-output).

Методы обработки пространственно-временных сигналов в MIMO-системе беспроводного доступа позволяют повысить пропускную способность канала без увеличения занимаемой полосы частот [1]. В то же время, адаптация приемной антенной решетки в релейском канале приводит к снижению вероятности ошибочного приема передаваемой информации и повышает устойчивость системы к воздействию активных помех [2].

MIMO; SISO; антенная решетка; активные помехи.

V.P. Fedosov

**ALGORITHMS OF COOPERATIVE ADAPTATION FOR RECEPTION
AND TRANSFERRING IN COMMUNICATION SYSTEM BASED ON ARRAYS
IN THE PRESENCE OF JAMMING**

The results of development and researching of adaptive algorithms in MIMO-communication system (multiple-input multiple-output) as at the transmitting and receiving ends of the line of a wireless access based on arrays with active interference of the same system as MIMO, and the system SISO (single-input single-output) are presented.

Methods of processing spatio-temporal signals in MIMO-system of the wireless access can increase the channel capacity without increasing the occupied bandwidth [1]. At the same time, the adaptation of the receiving antenna array in Rayleigh channel leads to decreasing the probability of erroneous reception of the transmitted information and increases the stability of the system to the effects of jamming. [2]

MIMO; SISO; array; active interference.

Представлены результаты разработки и исследований адаптивных алгоритмов в MIMO-системе связи (multiple-input multiple-output) как на передающем, так и на приемном концах линии беспроводного доступа на основе антенных решеток при наличии активной помехи как от аналогичной системы MIMO, так и от системы SISO (single-input single-output).

Методы обработки пространственно-временных сигналов в MIMO-системе беспроводного доступа позволяют повысить пропускную способность канала без увеличения занимаемой полосы частот [1]. В то же время, адаптация приемной антенной решетки в релейском канале приводит к снижению вероятности ошибочного приема передаваемой информации и повышает устойчивость системы к воздействию активных помех [2].

Рассмотрим систему связи, использующую M элементов передающей антенной решетки (АР) и N элементов приемной АР, с релейскими медленными затуханиями в канале связи. Принятые сигналы искажаются аддитивным шумом, статистически независимым для N приемников. В момент времени t передается M -мерный вектор-строка S_t и принимается N -мерный вектор строка X_t , [1] $X_t = \sqrt{\rho/M} S_t \mathbf{H} + \mathbf{W}_t$, где \mathbf{H} – $M \times N$ матрица комплексных случайных коэффициентов распространения в канале с нулевым математическим ожиданием, единичной дисперсией и с гауссовым распределением, а \mathbf{W}_t – N -мерный вектор аддитивного шума приемника с независимыми элементами. Мощность, подводимая к каждой передающей антенне, нормирована числом ее элементов.

Следовательно, величины в модели сигнала также нормализованы: отношение сигнал-шум ρ в каждой приемной антенне не зависит от числа передающих антенн.

Вид матрицы \mathbf{H} зависит от вида используемых АР на передачу и на прием: если применяются плотные антенные решетки, когда расстояние d_0 между фазовыми центрами равны $\lambda/2$ или $\lambda/3$, то \mathbf{H} имеет ненулевые коэффициенты распространения между крайними элементами приемной и передающей АР. Если используется разреженная АР при $d_0 = (3, \dots, 7)\lambda$, то \mathbf{H} имеет ленточный характер вдоль диагонали. При разнесенном приеме или использовании различной поляризации для каждого элемента (при малом их числе) – \mathbf{H} – имеет диагональный вид, поскольку пространственные каналы при этом взаимно независимы.

В простом случае допускается, что число элементов приемной АР равно числу элементов передающей АР, а релейский канал обладает медленными замираниями и не изменяет своих параметров в пределах времени передачи контрольной (обучающей) и информационной посылок. Контрольная посылка известна на приемном конце линии связи.

Поскольку используется дуплексная система связи, то одновременно как базовая, так и мобильная станции (БС и МС) работают на передачу и на прием, например, с частотным разделением каналов. Обе АР имеют запас по численности их элементов и разбиваются на блоки для применения алгоритмов адаптации к каждому блоку. Структура такой системы представлена на рис. 1, где использованы следующие обозначения: M_1 – число элементов в блоках АР на передачу и прием; $v_1^1, \dots, v_{M_1}^1$ – весовые коэффициенты передающей и приемной АР, равные коэффициентам собственного вектора для максимального собственного числа корреляционной матрицы принятого сигнала отдельно в базовой и мобильной станциях; x_{11}, \dots, x_{1M_1} – вектор излучаемых сигналов; y_{11}, \dots, y_{1M_1} – вектор принятых сигналов.

Далее, допускается, что имеется столько же приемных антенн, сколько и передающих, т.е. $N = M$, а также, что матрица распространения остается постоянной в течение определенного интервала времени, необходимого для передачи одной посылки (релейский канал с медленными замираниями). Матрица \mathbf{H} канала распространения определяется по критерию максимального правдоподобия или минимума среднеквадратической ошибки в приемниках на выходах АР в мобильной, а затем в базовой станциях.

Каждая приемная антенна связана с каждой передающей антенной через независимый случайный коэффициент распространения, имеющий релейское распределение амплитуды и равномерное распределение фазы при отсутствии прямого пути распространения. Если же имеет прямой путь, то распределение амплитуды соответствует обобщенному распределению Релея – Райса.

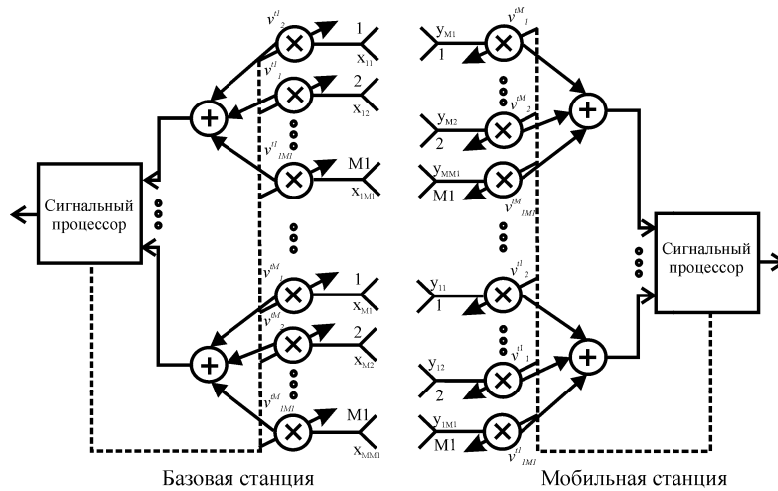


Рис. 1

Оценка принятого искаженного сигнала в приемнике осуществляется следующим образом [2]: $\mathbf{Y}^* = \mathbf{H}^+ \mathbf{X}$, где \mathbf{H}^+ – инверсная матрица (при одинаковом числе элементов АР на передачу и прием) или псевдоинверсная (при разных числах элементов АР) матрица \mathbf{H} .

При излучении БС контрольной посылки используется адаптация АР МС к релейскому каналу, которая заключается в ориентации максимума диаграммы направленности каждого блока в направлении прихода сигнала по пути, обеспечивающем максимум его мощности. При этом определяется корреляционная матрица принятых сигналов, рассчитываются ее собственные числа и собственные вектора. Затем выбирается максимальное собственное число и соответствующий ему собственный вектор и используется этот вектор в качестве весового для формирования диаграммы направленности, ориентированной максимумом в направлении прихода максимальной мощности сигнала, а нулями в направлениях остальных путей. После весового суммирования в каждом блоке приемной АР и приема контрольной посылки из базовой станции определяется принадлежность принятого вектора сигнальному вектору по корреляции переданного и принятого векторов. Если корреляция окажется слабой (входной вектор – помеховый), максимальное собственное число корреляционной матрицы отвергается и учитывается следующее по величине собственное число. Затем операции по проверке принятого вектора повторяются.

При наличии активной помехи в адаптивных антенных решетках выбор сигнального собственного числа корреляционной матрицы и использования соответствующего ему собственного вектора в качестве весового при формировании диаграмм направленности блоков АР автоматически обеспечивается подавление помехи формированием нуля в эквивалентной диаграмме направленности.

При наличии высокой корреляции между принятой и переданной контрольными посылками для использованной весовой обработки в режиме передачи базовой станции обеспечивается излучение контрольной посылки АР МС. Аналогичная адаптация применяется в режиме приема на выходе АР БС. В результате в режиме передачи информационной посылки АР БС и МС используется один путь, обеспечивающий передачу и прием полезного сигнала максимальной мощности.

Моделирование адаптивного алгоритма выполнено в модернизированной программе [3], учитывающей наличие помехи в релейском канале как от ММО, так и от SISO систем других приемо-передающих станций при выходе их передатчиков в

нелинейный режим. Кроме того, проведены исследования влияния неидентичности каналов БС и МС как на передачу, так и на прием. Результаты сравнительной оценки ММО-систем при адаптации и без адаптации представлены на рис. 2 и 3.

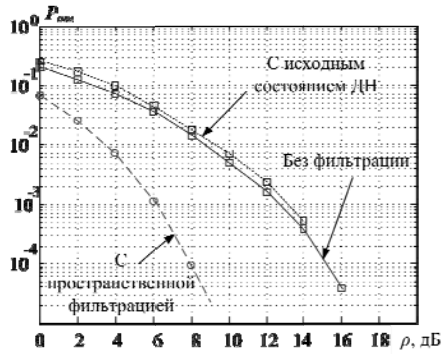


Рис. 2

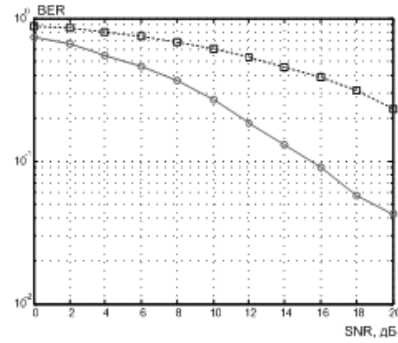


Рис. 3

На рис. 2 показана вероятность ошибки приема символов (BER) фазоманипулированного кода в зависимости от отношения сигнал/шум ρ (или SNR) в отсутствии помехи (с адаптацией и без нее) при приеме символа для $M = 2$, числе U элементов AP, равном 16 и числе элементов в блоках равно 8 без пространственной адаптивной фильтрации и с фильтрацией. На рис. 3 – также зависимость вероятности ошибки при воздействии помехи при соотношении помеха/шум 20 дБ без адаптации (штриховая линия) и с адаптацией (сплошная линия).

На рис. 4 и рис. 5 приведены зависимости вероятности $P_{\text{ош}}$ ошибки при наличии неидентичности каналов, обусловленной неточностью вычисления весовых коэффициентов по аргументу весовых коэффициентов в пределах интервалов $\Delta = (0; 5; 10; 15) \%$ (рис. 4) и по модулю весовых коэффициентов в пределах $\Delta = (0; 40 \text{ и } 60) \%$ (рис. 5).

На рис. 6 представлена зависимость пропускной способности $C(\rho)$ ММО-системы при наличии адаптации и в ее отсутствии (без помех) в зависимости от ОСШ ρ для 2-х элементной передающей антенны при числах U элементов AP, равных 4; 8 и 16.

В итоге, на основе анализа результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

- ◆ Использование пространственной фильтрации при сложных условиях распространения сигналов в релейском канале повышает эффективность приема сигналов. Вероятность приема ошибочного символа при этом снижается от 2,8 до 100 раз в диапазоне ОСП+Ш от нуля до 8 дБ при числе элементов передающей AP равно 2, числе элементов приемных AP равно 16 (по 8 элементов в каждом из антенных блоков).

Эффективность алгоритма проявляется также и при меньшем числе элементов AP в одном блоке (4 и 2).

Представленный алгоритм обеспечивает увеличение пропускной способности канала во всем диапазоне значений ОСШ. Например, при ОСШ равно 20 дБ повышение составляет от 1,1 до 1,5 раз в зависимости от числа элементов в блоке AP.

Ошибка в определении модуля весового вектора оказывает влияние на вероятность ошибочного приема, увеличивая ее, при высоких отношениях сигнал/шум. В то же время более существенное влияние на эту вероятность оказывает ошибка в

определении аргумента составляющих комплексного весового вектора, что позволяет задать допустимые пределы отклонения элементов весовых векторов от собственных векторов корреляционных матриц.

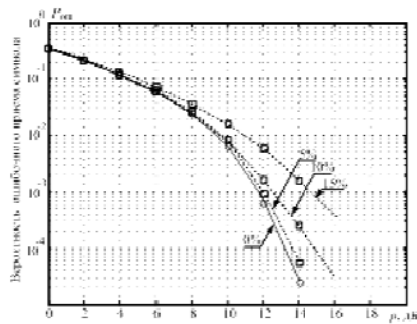


Рис. 4

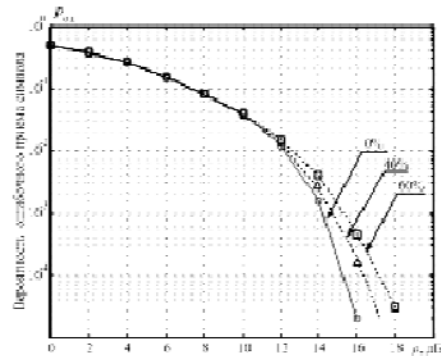


Рис. 5

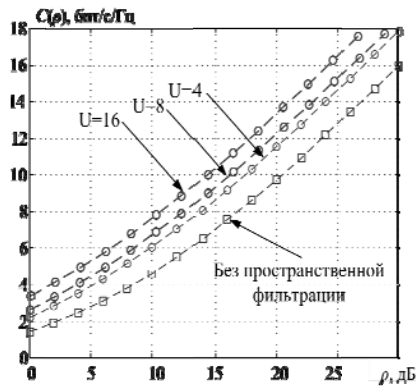


Рис. 6

При наличии активных помех в полосе приема ММО-системы применение пространственной адаптации как приемных, так и передающих антенных решеток позволяет снизить влияние помех на эффективность системы связи как по части снижения вероятности ошибок, так и увеличения пропускной способности канала связи.

Для каждого варианта реализации путей релейского канала имеется оптимальное число антенных элементов приемной АР и ее блоков при адаптации, позволяющее минимизировать вероятность ошибочного приема.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федосов В.П., Кучерявенко С.В., Муравицкий Н.С. Повышение эффективности радиосвязи в релейском канале на основе антенных решеток / В монографии «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» / Под. ред. В.А. Обуховца. – М.: Радиотехника, 2008. – С. 195-204.
2. Муравицкий Н.С., Федосов В.П. Метод улучшения приема в системе беспроводной передачи данных на основе антенных решеток при наличии активных помех // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние ЭВМ - ИРЭМВ». – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2009. – С. 412-515.
3. Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations. Technical Report 3rd Generation Partnership Project 3GPP TR 25.996 V6.1.0, 2003.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Федосов Валентин Петрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: fed_val@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП 17А; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Fedosov Valentine Petrovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: fed_val@tsure.ru; GSP 17A, 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.327.12

В.А. Обуховец, Ю.В. Юханов, А.И. Семенихин, Г.И. Костромитин

**СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН
И РАССЕИВАТЕЛЕЙ В БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЕ ЮЖНОГО
ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

В последние годы получили распространение измерительные системы на основе сверхширокополосных автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов (СШП АИВК) [1, 2]. Они реализуют СШП измерения электромагнитных полей методами ближней и дальней зон, как во временной, так и в частотной областях.

Штатное оборудование и программное обеспечение АИВК позволяют измерять радиотехнические характеристики антенн и радиолокационных объектов во временной и частотной областях, в ближней и дальней зонах, в диапазоне частот 1...37,5 ГГц [4].

В докладе рассматриваются параметры БЭК ТТИ, некоторые новые возможности и результаты измерений характеристик антенн, сканирующих антенных решеток (АР) и рассеивателей в ближней и дальней зонах, во временной и частотной областях.

БЭК (безэховая камера).

V.A. Obuhovets, Yu.V. Yukhanov, A.I. Semenikhin, G.I. Kostromitin

**ULTRAWIDEBANDED MEASURES OF CHARACTERISTICS
OF ANTENNAS AND SCATTERERS IN THE ANECHOIC CHAMBER
AT SOUTHERN FEDERAL UNIVERSITY**

In recent years, a proliferation of measurement systems based on UWB automated measuring and computing systems (UWB AIVK) [1,2] are spread. They implement a UWB measurement of electromagnetic fields by methods of near and far zones, both in time and frequency domains.

Original equipment and software AIVK can measure the radio technical characteristics of antennas and radiolokatsionnye objects in the time and frequency domains, in the near and far zones, in the frequency range 1 ... 37.5 GHz [4].

In the report the options BEC TIT, some new features and measurements of antenna parameters, scanning arrays (AR) and the scatterers in the near and far zones, in both time and frequency domains are observed.

BEC (bezekhovy chamber).

В последние годы получили распространение измерительные системы на основе сверхширокополосных автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов (СШП АИВК) [1, 2]. Они реализуют СШП измерения электромагнитных полей методами ближней и дальней зон, как во временной, так и в частотной областях.

В Таганрогском технологическом институте Южного федерального университета (ТТИ ЮФУ) в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» в 2008 году введена в эксплуатацию единственная