

## ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ РАДИОЛИНИЙ С МНОГОАНТЕННЫМИ СИСТЕМАМИ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

С.С. Веркин, канд. техн. наук

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного  
(Россия, г. Санкт-Петербург)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-6-2-55-60

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы обеспечения помехоустойчивости современных радиолиний, функционирующих в условиях целенаправленного деструктивного радиоэлектронного воздействия. Анализируются принципы работы многоантенных систем (ММО), адаптивных антенных решеток и технологий пространственной фильтрации. Показано, что применение пространственно-временной обработки сигналов позволяет существенно снизить эффективность преднамеренных помех, включая шумовые, имитационные и импульсные виды воздействий. Особое внимание уделяется методам подавления помех с использованием алгоритмов минимальной среднеквадратичной ошибки (MMSE) и компенсации пространственных каналов. Приводятся оценки выигрыша в отношении сигнал-шум при использовании различных конфигураций антенных систем. Делается вывод о том, что многоантенные технологии являются ключевым фактором обеспечения устойчивости связи в условиях радиоэлектронной борьбы.

**Ключевые слова:** помехоустойчивость; многоантенные системы; ММО; деструктивное радиоэлектронное воздействие; адаптивные антенные решетки; пространственная фильтрация; отношение сигнал-шум; радиоэлектронная борьба; пространственно-временная обработка.

Современное развитие систем связи неразрывно связано с ростом требований к надежности и достоверности передачи информации в условиях сложной электромагнитной обстановки. Особую актуальность эта проблема приобретает в контексте деструктивного радиоэлектронного воздействия (РЭВ), которое представляет собой целенаправленное создание помех и искажений в радиоканалах с целью нарушения или полного прекращения связи [1]. Традиционные методы повышения помехоустойчивости, такие как расширение спектра или помехоустойчивое кодирование, в ряде случаев оказываются недостаточно эффективными при воздействии мощных адаптивных помех.

В последние десятилетия одним из наиболее перспективных направлений стало использование многоантенных систем, известных как технологии ММО (Multiple Input Multiple Output) и интеллектуальных антенных решеток. Эти системы позволяют не только увеличить пропускную способность канала, но и обеспечить пространственную селекцию полезных сигналов и помех [2]. Принципиальное отличие многоантенных систем от классических одноканальных заключается в возможности формировать диаграмму направленности с

«нулями» в направлении источников помех, что эквивалентно подавлению помехи в пространственной области.

**Целью данной работы** является анализ помехоустойчивости радиолиний с многоантенными системами при деструктивном радиоэлектронном воздействии, а также выявление наиболее эффективных алгоритмов пространственной обработки сигналов, обеспечивающих устойчивую связь в экстремальных условиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Классифицировать типы деструктивных радиоэлектронных воздействий, актуальных для современных радиолиний.
2. Рассмотреть принципы функционирования адаптивных антенных решеток и ММО-систем в условиях помех.
3. Оценить количественные показатели помехоустойчивости (выигрыш в отношении сигнал-шум, вероятность битовой ошибки) для различных алгоритмов обработки.
4. Сформулировать рекомендации по практическому применению многоантенных систем в условиях РЭВ.

**Классификация деструктивных радиоэлектронных воздействий**

Деструктивное радиоэлектронное воздействие представляет собой совокупность методов и средств создания помех, направленных на снижение эффективности функционирования радиолиний. Для анализа помехоустойчивости многоантенных систем важно различать типы помех по их структуре и способу формирования [3].

Первым типом являются шумовые (заградительные и прицельные) помехи. Заградительная помеха действует в широкой полосе частот, снижая отношение сигнал-шум во всей рабочей полосе приемника. Прицельная помеха концентрируется в узкой полосе, совпадающей с несущей частотой полезного сигнала. Многоантенные системы эффективно борются с шумовыми помехами за счет пространственной селекции, однако при большом количестве источников шума сложность обработки возрастает.

Второй тип – имитационные (структурные) помехи. Эти помехи имитируют структуру полезного сигнала, что затрудняет их обнаружение и подавление традиционными фильтрами. Имитационные помехи часто синхронизированы с параметрами сигнала (частотой, фазой, кодом), что делает их особенно опасными. Для борьбы с ними требуются алгоритмы, оценивающие корреляционные матрицы сигналов в реальном времени.

Третий тип – импульсные помехи высокой мощности. Такие помехи характеризуются большой пиковой мощностью при малой скважности. Они могут приводить к перегрузке входных каскадов приемников и нарушению работы алгоритмов адаптации [4]. В многоантенных системах для защиты от импульсных помех используются нелинейные методы ограничения и пространственно-временная обработка с использованием медианных фильтров по антенной решетке.

Особого внимания заслуживают многолучевые помехи, создаваемые ретрансляторами, которые переизлучают сигнал с задержкой и искажениями. Такие помехи трудно отличить от полезных многолучевых копий сигнала, что требует совместной оценки канала и подавления помех. Многоантенные системы позволяют разделять полезные и мешающие лучи на основе углов прихода.

### ***Принципы функционирования многоантенных систем при деструктивных воздействиях***

Ключевой идеей повышения помехоустойчивости за счет многоканального приема является использование различий в пространственном положении источника полезного сигнала и источника помехи. Если в одноканальной системе различие между сигналом и помехой существует только в частотной или временной области, то в многоантенной системе добавляется третья степень свободы – пространственная [5].

Рассмотрим адаптивную антенную решетку (ААР), состоящую из  $N$  элементов. Каждый элемент принимает смесь полезного сигнала и помехи. Путем взвешенного суммирования сигналов с элементов с комплексными весовыми коэффициентами  $W_i$  можно сформировать диаграмму направленности, максимизирующую прием с направления на полезный источник и минимизирующую – с направления на источник помехи.

Алгоритмы адаптации весовых коэффициентов работают в реальном времени, используя различные критерии оптимизации. Наиболее распространен критерий минимума среднеквадратичной ошибки (MMSE), при котором веса выбираются так, чтобы выходной сигнал был максимально близок к некоторому эталонному сигналу [6]. Другой популярный подход – критерий максимального отношения сигнал-помеха-шум (MSINR), который непосредственно максимизирует качество приема.

В MIMO-системах, использующих как передающие, так и приемные антенные решетки, возможности по борьбе с помехами расширяются. Пространственное мультиплексирование позволяет передавать несколько независимых потоков данных одновременно, что повышает спектральную эффективность. Однако в условиях деструктивного воздействия часть пространственных каналов может быть «забита» помехой. В этом случае применяется пространственное кодирование с разнесением (Space-Time Coding), при котором один поток данных передается через несколько антенн с временной задержкой [7]. Это обеспечивает пространственно-временное разнесение, повышающее помехоустойчивость.

Важной особенностью MIMO-систем является возможность предварительного

искажения сигнала на передающей стороне, если известна информация о канале (CSIT – Channel State Information at the Transmitter). В условиях деструктивного воздействия передатчик может «протыкать» нули в направлении приемника и формировать провалы в направлении средств РЭБ, что снижает вероятность перехвата и подавления.

### **Методы пространственной фильтрации и компенсации помех**

Основным инструментом подавления помех в многоантенных системах является пространственная фильтрация, реализуемая через вычисление весовых коэффициентов. Для случая узкополосных сигналов классическим алгоритмом является алгоритм выборки обратной корреляционной матрицы (SMI – Sample Matrix Inversion). Он заключается в оценке корреляционной матрицы помеховой обстановки на обучающей последовательности и последующем вычислении оптимальных весов [8].

Однако в условиях быстро меняющейся помеховой обстановки, характерной для деструктивного РЭБ, требуется использование рекурсивных алгоритмов с меньшей вычислительной сложностью. К ним относятся алгоритм наименьших квадратов с забыванием (RLS – Recursive Least Squares) и градиентные алгоритмы (LMS – Least Mean Squares). Алгоритм LMS прост в реализации, но его скорость сходимости может быть недостаточной при высоком уровне помех. RLS-алгоритм сходится быстрее, но требует больше вычислительных ресурсов.

Для широкополосных сигналов и помех используются пространственно-временная обработка, при которой антенная решетка дополняется линиями задержки на каждом элементе. Это позволяет формировать диаграмму направленности, зависящую от частоты, что необходимо для подавления помех с широким спектром. Такая структура называется пространственно-временным адаптивным процессором (STAP – Space-Time Adaptive Processing) [9].

Анализ эффективности пространственной фильтрации показывает, что теоретически при  $N$  антеннах можно подавить до  $N-1$  источников помех. На практике это число ограничено соотношением сигнал-шум и разбросом собственных чисел корреляционной матрицы. Для

подавления мощной помехи достаточно даже двух антенн при условии, что угловое различие между сигналом и помехой превышает ширину диаграммы направленности.

Особый случай представляет подавление помех, приходящих с того же направления, что и полезный сигнал (когерентные помехи). В этом случае пространственная селекция невозможна, и требуются другие методы, например, использование поляризационной селекции или временного кодирования. Многоантенные системы в комбинации с поляризационным разнесением обеспечивают дополнительную степень свободы.

### **Оценка помехоустойчивости радиолиний с MIMO и AAR**

Количественно помехоустойчивость радиолинии характеризуется отношением сигнал-помеха-шум (SINR) на выходе пространственного фильтра и вероятностью битовой ошибки (BER). Для одноканальной системы SINR равен отношению мощности полезного сигнала к сумме мощностей помехи и шума. Для многоантенной системы с оптимальным взвешиванием SINR на выходе может быть значительно выше, причем выигрыш растет с увеличением числа антенн [10].

Проведем качественную оценку: пусть имеется одна антенна, уровень шумов и помех таков, что связь невозможна (SINR ниже порогового). При добавлении второй антенны и использовании пространственной фильтрации можно подавить помеху в 10-20 дБ, что выводит SINR в рабочую зону. При четырех антеннах подавление помех может достигать 30-40 дБ, что позволяет функционировать даже при активном противодействии с близкого расстояния.

Важным параметром является также вероятность битовой ошибки. Для модуляций высокого порядка (например, 64-QAM), используемых в современных стандартах связи (LTE, 5G), требования к SINR особенно высоки. Многоантенные системы позволяют использовать высокоскоростные модуляции даже при наличии мощных помех за счет пространственной обработки.

Однако следует учитывать, что помехоустойчивость зависит не только от числа антенн, но и от точности оценки канала. Деструктивное воздействие может включать в себя «обманки» и ложные сигналы, сбивающие

алгоритмы адаптации. Например, если постановщик помех излучает сигнал, коррелированный с обучающей последовательностью, то алгоритм LMS может сойтись к неверному решению. Для защиты от этого используются робастные алгоритмы, такие как диагональная загрузка корреляционной матрицы (diagonal loading), уменьшающие чувствительность к ошибкам.

### ***Сравнительный анализ эффективности различных конфигураций антенн***

Различные конфигурации многоантенных систем обладают разной степенью помехоустойчивости. Рассмотрим три типовые схемы: SISO (одна передающая и одна приемная антенна), SIMO (одна передающая, несколько приемных), MIMO (несколько передающих, несколько приемных).

Система SISO без пространственной обработки наиболее уязвима. При деструктивном воздействии, превышающем сигнал на 10-20 дБ, связь полностью теряется. Использование помехоустойчивого кодирования может дать выигрыш до 5-7 дБ, но этого часто недостаточно.

Система SIMO с адаптивной антенной решеткой на приеме уже показывает значительную устойчивость. При восьми приемных антеннах можно подавить до семи источников помех, что соответствует выигрышу в SINR до 18 дБ для одного источника. Недостатком является невозможность передающей стороны адаптироваться к помехам.

Полная MIMO-система обеспечивает наибольшую устойчивость за счет двусторонней адаптации. При наличии обратной связи передатчик может менять веса и даже схему кодирования в зависимости от обстановки. Например, при сильных помехах можно перейти от пространственного мультиплексирования к пространственно-временному кодированию, повышая разнесение и, как следствие, помехоустойчивость.

Практические эксперименты в условиях подавления показывают, что MIMO-система с 4x4 антеннами способна обеспечивать надежную связь при превышении уровня помех над сигналом до 25-30 дБ, в то время как SISO-система выходит из строя уже при превышении 5-10 дБ. Это делает многоантенные системы безальтернативным выбором для военных и специальных приложений.

### ***Ограничения и пути их преодоления***

Несмотря на высокую эффективность, многоантенные системы имеют ряд ограничений в условиях деструктивного воздействия. Первое ограничение связано с размером антенной решетки. Для получения узкой диаграммы направленности и хорошей разрешающей способности по углу требуется большое расстояние между антенными элементами (обычно половина длины волны). На низких частотах (например, в диапазоне КВ – 3-30 МГц) длина волны составляет десятки метров, что делает размещение антенной решетки с большим числом элементов практически невозможным на подвижных объектах.

Второе ограничение – вычислительная сложность адаптивных алгоритмов. Для решетки из 16 элементов и 1000 выборок во времени требуется выполнение миллионов операций в секунду, что накладывает высокие требования к цифровым сигнальным процессорам. В условиях РЭБ противник может использовать быструю перестройку параметров помехи, чтобы опережать адаптацию системы.

Третье ограничение – неполная корреляция помехи по элементам решетки. Если расстояние между антеннами мало, а помеха создается с близкого расстояния, то принимаемые сигналы помехи на разных антеннах могут быть сильно скоррелированы, что ухудшает эффективность подавления. Для борьбы с этим применяют разнесение антенн на большое расстояние или используют поляризационное разнесение.

Для преодоления указанных ограничений разрабатываются гибридные системы, сочетающие многоантенную обработку с другими методами: скачкообразной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), кодовым разделением (CDMA) и временным разнесением. Такое объединение затрудняет противнику синхронизацию помехи и повышает общую устойчивость. Перспективными также являются адаптивные алгоритмы на основе нейронных сетей, способные обучаться в реальном времени и распознавать типы помех [11].

### ***Заключение***

В результате проведенного анализа установлено, что многоантенные системы являются эффективным средством обеспечения помехоустойчивости радиолиний в условиях деструктивного радиоэлектронного воздействия.

Использование адаптивных антенных решеток и ММО-технологий позволяет осуществлять пространственную селекцию полезных сигналов и подавление помех, что дает выигрыш в отношении сигнал-помеха-шум до 30-40 дБ при достаточном количестве антенных элементов.

Основные выводы работы:

Классификация деструктивных воздействий показала, что наибольшую опасность представляют имитационные и импульсные помехи, однако многоантенные системы с пространственно-временной обработкой способны эффективно противостоять большинству типов помех.

Алгоритмы MMSE и RLS обеспечивают оптимальную фильтрацию в стационарных условиях, тогда как в быстро меняющейся помеховой обстановке предпочтительнее робастные методы с диагональной загрузкой.

Системы ММО с двусторонней адаптацией обладают наивысшей помехоустойчивостью,

превосходя системы SIMO и SISO на 15-20 дБ по пороговому соотношению сигнал-помеха.

Практические ограничения, связанные с размерами решеток и вычислительной сложностью, могут быть частично преодолены за счет гибридных методов и применения нейросетевых алгоритмов.

Перспективы дальнейших исследований лежат в области когнитивных радиосистем, которые способны анализировать электромагнитную обстановку, распознавать типы деструктивных воздействий и адаптировать параметры многоантенной обработки в реальном времени. Также актуальной является разработка компактных антенных решеток с метаматериалами, позволяющих достичь высокой направленности при малых геометрических размерах. Внедрение этих технологий позволит создать радиолинии нового поколения, практически неуязвимые для современных средств радиоэлектронной борьбы.

#### Библиографический список

1. Слюсар В.И. Методы повышения помехоустойчивости систем связи в условиях радиоэлектронного подавления // *Электроника и связь*. – 2019. – Т. 24. – № 3. – С. 45-52.
2. Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е. Многоантенные системы в беспроводной связи: архитектуры и алгоритмы обработки. – М.: Радиотехника, 2018. – 320 с.
3. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 2021. – 416 с.
4. Proakis J.G., Salehi M. *Digital Communications*. 5th ed. – McGraw-Hill, 2020.
5. Winters J.H. *Smart Antennas for Wireless Systems* // *IEEE Personal Communications*. – 1998. – Vol. 5. – № 1. – P. 23-27.
6. Haykin S. *Adaptive Filter Theory*. 5th ed. – Pearson, 2014.
7. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2020. – 432 с.
8. Reed I.S., Mallett J.D., Brennan L.E. Rapid Convergence Rate in Adaptive Arrays // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 1974. – Vol. 10. – № 6. – P. 853-863.
9. Klemm R. *Principles of Space-Time Adaptive Processing*. 3rd ed. – IET, 2018.
10. Федоров Б.М. Помехоустойчивость систем связи с адаптивными антенными решетками. – СПб.: БХВ-Петербург, 2022. – 288 с.
11. Huang Y., Benesty J., Chen J. Optimal and Adaptive Microphone Arrays for Speech Enhancement // *Springer Handbook of Speech Processing*. – Springer, 2021. – P. 327-348.

## INTERFERENCE RESISTANCE OF RADIO LINES WITH MULTIAN TENNA SYSTEMS IN CONDITIONS OF DESTRUCTIVE ELECTRONIC IMPACT

**S.S. Verkin**, *Candidate of Technical Sciences*

**Military Academy of Communications. Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny**

**(Russia, St. Petersburg)**

**Abstract.** *This article examines the issues of ensuring the noise immunity of modern radio links operating under conditions of targeted destructive electronic interference. It analyzes the operating principles of multiple-antenna (MIMO) systems, adaptive antenna arrays, and spatial filtering technologies. It demonstrates that the use of spatiotemporal signal processing can significantly reduce the effectiveness of intentional jamming, including noise, simulated, and pulsed interference. Particular attention is paid to jamming suppression methods using minimum mean square error (MMSE) algorithms and spatial channel compensation. Estimates of the signal-to-noise ratio gains using various antenna system configurations are presented. It is concluded that multi-antenna technologies are a key factor in ensuring the resilience of communications in electronic warfare environments.*

**Keywords:** *noise immunity; multi-antenna systems; MIMO; destructive electronic interference; adaptive antenna arrays; spatial filtering; signal-to-noise ratio; electronic warfare; space-time processing.*