

STATE AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF TROPOSPHERIC COMMUNICATIONS IN THE SYSTEM OF MILITARY COMMUNICATIONS OF THE ARMED FORCES

Ivanov V. G.⁴, Lukyanchik V. N.⁵, Bashirov S. Y.⁶

Keywords: communication system, tropospheric communication, military communication, tropospheric station, over-the-horizon propagation, communication development.

Abstract

The purpose of the work: to conduct a retrospective analysis of the development of tropospheric communications in the Armed Forces, to develop practical proposals for the development of tropospheric communication facilities at the present time, taking into account technological development and experience in organizing communications in a special military operation.

Research method: the methodological basis of the research is the general theory of systems, the theory of military communications, the theory of open systems using the methods of system analysis. The reliability of the results is ensured by the practical implementation of the directions of development of tropospheric communication in the military communications system of the Armed Forces attached in the article.

Results of the study: the analysis of the development of tropospheric communication facilities in the Armed Forces of the USSR, their state in the Russian Federation and in the armies of NATO countries at the present time has been carried out. Proposals have been developed on the method of application of «point-to-multipoint» and the main directions for improving military tropospheric stations.

Scientific novelty: consists in the development of substantiated directions for the development of tropospheric communications, taking into account the requirements for ensuring the management and technological development of military communications.

References

1. Bazovye sredstva, komplekсы i sistemy voennoj svyazi: ehnciklopedicheskiy spravochnik. T. 1. / Pod red. professora G. I. Azarova. Mytishchi: 16 CNII MO RF, 2005. – P. 119.
2. Antropov D. A. Radiorelejnyaya svyaz' v sistemah upravleniya otechestvennykh gruppirovok vojsk (sil): stanovlenie i razvitiye // Voенno-istoricheskij zhurnal. – 2023. – No 1. – Pp. 85–98.
3. Gusyatinskiy I. A., Nemirovskij A. S., Sokolov A. V., Troickij V. N. Dal'nyaya troposfernaya radiosvyaz'. M.: Svyaz', 1968. – P. 248.
4. Anisimov V. G., Myrova L. O. Obosnovanie optimal'nykh sposobov postroeniya perspektivnykh troposfernykh stancij // T-Comm: Telekommunikacii i transport. – 2019. – Vol. 13. – No 5. – Pp. 21–27.
5. Ivanov V. G. Teoriya i praktika postroeniya i obespecheniya funkcionirovaniya sistemy svyazi special'nogo naznacheniya s uchytom tehnologicheskogo razvitiya i opytov vooruzhennykh konfliktov / Monografiya V. G. Ivanov. – M.: Krasnaya Zvezda, 2025. – P. 304.
6. Luferchik P. V., Luferchik A. V., Galeev R. G., Bogatyrev E. V., Shtro P. V. Povyshenie ehnergeticheskikh harakteristik modema troposfernoj svyazi // Uspehi sovremennoj radioehlektroniki. – 2022. – No 76 (5). – Pp. 50–54.
7. Vorob'ev N. A., Luferchik P. V., Shtro P. V., Bogatyrev E. V. Issledovanie harakteristik nestacionarnosti troposferного kanala svyazi // Zhurnal Ural Radio Engineering Journal. – 2023. No 7 (2). – Pp. 123–136.
8. Mackov A. A., Perspektivy ispol'zovaniya linij zagorizontnoj svyazi // A. A. Mackov, V. V. Serov, L. I. Chernobel'skij // Ehlektrosvyaz'. – 2006. – No 8. – Pp. 33–38.
9. Slyusar V. I., Masesov N. A. Ocenka granichnykh vozmozhnostej prostranstvennogo uplotneniya kanalov troposfernoj svyazi v rezhime mul'ti-MIMO / V. I. Slyusar, N. A. Masesov // XV Mezhdunarodnaya nauchnotehnicheskaya konferenciya «Informacionnye sistemy i tehnologii (IST-2009)» Nizhegorodskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet im. R. E. Alekseeva, 2009. – Pp. 90–92.
10. Luferchik P. V., Komarov A. A., Shtro P. V., Konev A. N. Razrabotka adaptivnoj sistemy svyazi na osnove OFDM dlya troposferного i radiorelejного kanala // Izvestiya YUFU. Tehničeskie nauki. – 2022. – No 4. – Pp. 244–250.
11. Mihajlina E. O. Ispol'zovanie novykh tehnologij v troposfernoj sisteme svyazi // Novye informacionnye tehnologii v nauchnykh issledovaniyah: materialy XXX Vserossijskoj nauchno-tehničeskoj konferencii studentov, molodyh uchenykh i specialistov / Izdatel'stvo IP Konyahin A. V. (Book Jet). – 2025. – Pp. 140–141.

4. **Vasily G. Ivanov**, Dr.Sc. of Military Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Informatics and Computer Engineering of the faculty (Engineering), Academy of Civil Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters named after Lieutenant General D. I. Mikhailik. Khimki, Russia. E-mail: v.ivanov@agz.50.mchs.gov.ru

5. **Valentin N. Lukyanchik**, Ph.D. of Military Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Research Center of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. St. Petersburg, Russia. E-mail: v-lukyanchik@bk.ru

6. **Sergey Yu. Bashirov**, Deputy Head of the Department of the Main Directorate of Communications of the Armed Forces of the Russian Federation. Moscow, Russia. E-mail: wasj2006@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АЛГОРИТМА ПОДСТРОЙКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ АДАПТИВНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Цветков Д. Е.¹, Федоров П. Н.²

DOI:10.21681/3034-4050-2026-3-13-20

Ключевые слова: диаграмма направленности, пространственная фильтрация, весовые коэффициенты, алгоритмы адаптации, безопорные алгоритмы, методы подпространств, матрица ковариации, математическое моделирование, подавление помех, робастность.

Аннотация

Цель работы состоит в анализе и разработке математической модели алгоритма адаптации весовых коэффициентов для адаптивных антенных решеток (ААР), а также в оценке его эффективности при подавлении сложных пространственно-распределенных радиопомех.

Методы исследования: математическое и имитационное моделирование в программной среде MatLab, а также методы матричной алгебры, теории случайных процессов и статистической радиотехники для расчета корреляционных матриц и весовых векторов. Для оценки качества пространственной фильтрации использовался сравнительный анализ вычислительной сложности классических градиентных методов и селективности современных робастных безопорных алгоритмов при различных угловых распределениях источников помех.

Результаты исследования показали, что для мобильных систем с жесткими ограничениями аппаратных ресурсов наиболее эффективным является алгоритм наименьших средних квадратов (LMS), который благодаря линейной вычислительной сложности обеспечивает уверенное формирование глубоких нулей в направлении источников помех. При этом установлено, что в условиях априорной неопределенности и отсутствия опорного сигнала классические методы теряют работоспособность, что требует перехода к безопорным алгоритмам. Моделирование сложных многокомпонентных помех выявило критическую уязвимость стандартного метода LCMV к ошибкам пеленгации, приводящую к эффекту самоподавления полезного сигнала. Для решения этой проблемы успешно протестирован модифицированный робастный алгоритм RAIS-LCMV. Испытания доказали, что его применение в стационарных режимах инициализации позволяет итеративно реконструировать фактический вектор направленности на основе глубокого анализа собственных векторов ковариационной матрицы. Это полностью исключает эффект самоподавления и гарантирует формирование многолучевых глубоких провалов диаграммы направленности точно на источники комбинированных помех, сохраняя при этом максимальный коэффициент передачи в направлении целевого сигнала.

Практическая ценность исследования заключается в комплексном обосновании гибридного подхода к пространственной фильтрации, объединяющего высокоточную инициализацию решетки робастным алгоритмом RAIS-LCMV в стационарном режиме с последующим переходом на малозатратные градиентные методы в динамике. Математически доказана эффективность данного подхода для устранения эффекта самоподавления сигнала в условиях многокомпонентного радиоэлектронного противодействия.

Введение

Стремительное развитие современных радиотехнических систем, включая комплексы радиолокации, сети мобильной связи поколений 5G/6G и системы радиоэлектронной борьбы (РЭБ), требует принципиально новых подходов к помехозащищенности. Традиционные методы частотной и временной фильтрации оказываются недостаточно эффективными в условиях плотного электромагнитного спектра и преднамеренных широкополосных воздействий. Решением этой проблемы стало массовое внедрение адаптивных антенных решеток (ААР).

Антенная решётка представляет собой набор идентичных антенных элементов, определенным образом размещённых в пространстве. Ключевое отличие ААР от классических фазированных антенных решеток (ФАР) заключается в наличии полнофункционального цифрового диаграммообразующего устройства (блок пространственной обработки сигнала) и встроенных математических алгоритмов оптимизации (рис. 1). Главная особенность таких систем – это способность автоматически и в реальном времени изменять свои пространственные характеристики (адаптировать форму диаграммы направленности) для

¹ Цветков Дмитрий Евгеньевич, оператор научной роты, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: tsvetkovde123@gmail.com

² Федоров Павел Николаевич, старший научный сотрудник НИО-4 Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Будённого. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: fedorovpn1@yandex.ru

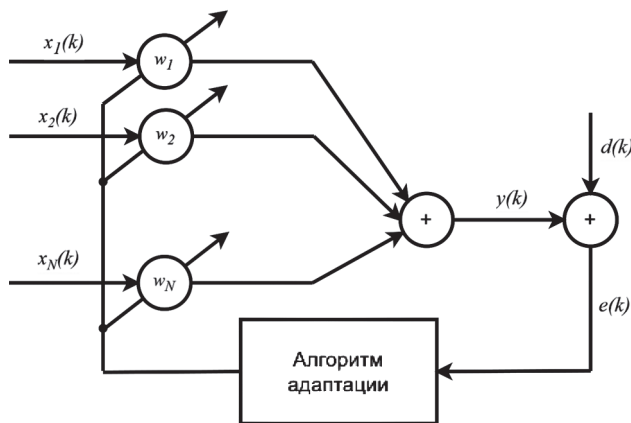


Рис. 1. Структурная схема адаптивной антенной решетки

максимизации отношения сигнал/помеха+шум (SINR).

Архитектура современной цифровой ААР состоит из нескольких фундаментальных компонентов.

Во-первых, это сама геометрия решетки: линейная, плоская или конформная. Для исключения эффекта появления дифракционных максимумов или «ложных лепестков» расстояние между соседними элементами обычно выбирается равным половине длины волны ($\lambda/2$).

Во-вторых, приемопередающие модули: каждый антенный элемент связан со своим независимым радиочастотным трактом, включающим маломощный усилитель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровой квадратурный демодулятор.

В-третьих, высокопроизводительный цифровой сигнальный процессор или ПЛИС, который непосредственно реализует сложные алгоритмы вычисления весовых коэффициентов.

Основной физический принцип работы ААР базируется на явлении пространственной интерференции электромагнитных волн. Управление формой луча осуществляется посредством комплексного взвешивания. Когда электромагнитные волны, принимаемые каждым элементом решетки, после цифрового сдвига фаз программно совмещаются в фазе для определенного угла прихода, они интерферируют конструктивно. В результате происходит когерентное сложение (синтез остронаправленного главного лепестка). Если же фазы не совпадают, волны гасят друг друга (деструктивная интерференция). Интеллектуально манипулируя амплитудой и фазой каждого канала, система формирует глубокие «нули» (зоны подавления до $-30...-50$ дБ) диаграммы направленности точно в направлениях источников активных помех [1, 2].

Математический аппарат пространственной фильтрации

Способность динамически перестраивать диаграмму направленности достигается путем перемножения вектора входных сигналов $X(t)$ на комплексный весовой вектор

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T, \quad (1)$$

где N – количество элементов антенной решетки.

В общем виде модель принимаемого сигнала можно описать векторно-матричным уравнением:

$$X(t) = A(\theta)S(t) + \sum_{i=1}^K A(\theta_i)J_i(t) + N(t), \quad (2)$$

где $A(\theta)$ – вектор пространственной направленности полезного сигнала $S(t)$, приходящего с угла θ ; $J_i(t)$ – сигналы K независимых источников помех; $N(t)$ – вектор шума приемников (аддитивный белый гауссовский шум).

Выходной сигнал системы формируется как скалярное произведение вектора весов и вектора принятых сигналов (в эрмитовом сопряжении):

$$y(t) = W^H X(t). \quad (3)$$

Фундаментальной математической задачей всех алгоритмов пространственной адаптации является поиск такого оптимального вектора W_{opt} , который минимизирует среднеквадратическую ошибку (СКО) между выходным сигналом $y(t)$ и некоторым известным эталонным сигналом $d(t)$. Эта задача описывается классическим уравнением Винера-Хопфа:

$$W_{opt} = R_{xx}^{-1} r_{xd}, \quad (4)$$

где $R_{xx} = E[X(t)X^H(t)]$ – пространственная корреляционная матрица входных сигналов; $r_{xd} = E[X(t)d^*(t)]$ – вектор взаимной корреляции между входным вектором и эталонным сигналом.

На практике точное вычисление уравнения Винера-Хопфа затруднено из-за необходимости обращения матрицы R_{xx} . Поэтому используются адаптивные методы, которые были проанализированы в ходе исследования: LMS, SMI и RLS.

Алгоритм SMI (Sample Matrix Inversion) использует метод прямой оценки, который вычисляет приближенную (выборочную) матрицу ковариации:

$$\hat{R} = \frac{1}{K} \sum_{n=1}^K X(n)X^H(n), \quad (5)$$

на ограниченном временном окне в K отсчетов, а затем напрямую обращает её:

$$W_{SMI} = \hat{R}^{-1} r_{xd}. \quad (6)$$

Хотя SMI обеспечивает чрезвычайно высокую скорость сходимости (достаточно $2N$ отсчетов),

алгоритм обладает кубической вычислительной сложностью $O(N^3)$ из-за операции обращения матрицы. При большом числе элементов ААР это делает его непрактичным, к тому же алгоритм крайне чувствителен к сингулярности (числовой обусловленности) матрицы [3].

Алгоритм RLS (Recursive Least Squares) использует лемму об обращении матриц для рекурсивного обновления обратной корреляционной матрицы без прямого вычисления обратной матрицы на каждом такте. Математический аппарат включает вычисление калманского вектора усиления $k(n)$ и пересчет матрицы с использованием «параметра забывания» λ (где $0 < \lambda \leq 10 < \lambda \leq 1$). Параметр забывания позволяет алгоритму адаптироваться к нестационарным каналам: чем меньше λ , тем быстрее система «забывает» старые данные. Сложность RLS составляет $O(N^2)$, что делает его оптимально сбалансированным с точки зрения скорости и сложности вычисления, однако для высокоскоростных боевых комплексов ресурсов процессора все еще может не хватать [4].

Алгоритм LMS (Least Mean Squares) обладает наименьшей вычислительной мощностью. Он представляет собой итеративную процедуру стохастического градиентного спуска. Вместо работы с полными матрицами, он использует мгновенные оценки градиента [5]. Ошибка вычисляется по формуле

$$e(n) = d(n) - y(n). \quad (7)$$

Обновление весовых коэффициентов выполняется по выражению:

$$W(n+1) = W(n) + \mu X(n)e^*(n), \quad (8)$$

где μ – параметр шага адаптации.

Вычислительная сложность алгоритма линейна $O(N)$. Ключевой проблемой LMS является выбор шага μ : слишком большое значение приведет к расходимости алгоритма, а слишком малое – к критически медленной сходимости: алгоритм не успеет перестроиться при быстром движении источника помехи. Медленная сходимость особенно проявляется при работе с сильно коррелированными сигналами (когда число обусловленности корреляционной матрицы велико). Однако в условиях ограниченных ресурсов и энергопотребления (например, беспилотные аппараты), LMS является оптимальным выбором с точки зрения применения на БПЛА [6, 7, 8].

Имитационное моделирование алгоритма LMS в среде MatLab

Для верификации теоретических выкладок и детального анализа переходных процессов в программной среде MatLab была создана

развернутая имитационная модель ААР. Была смоделирована эквидистантная решетка, состоящая из 4 антенных элементов с шагом $d = \lambda/2$. Соотношение сигнал/шум (SNR) было установлено на уровне 10 дБ, а отношение помеха/шум (INR) – на уровне 30 дБ (мощная подавляющая помеха).

В разработанной модели полезный (управляющий) сигнал был зафиксирован под углом 30° относительно нормали решетки. Направленная широкополосная помеха программно меняла угол прихода в азимутальном диапазоне от 0° до 360° . Для оценки качества адаптации анализировалась глубина формируемых нулей и уровень боковых лепестков.

Результаты моделирования подтвердили высокую эффективность LMS для задач пространственной фильтрации. На полярных и декартовых графиках отчетливо видно, как система в реальном времени подстраивает веса под меняющуюся обстановку. При удаленном расположении сигнала помехи (например, азимут 210°) алгоритм уверенно формирует глубокий нуль с коэффициентом подавления, достигающим -35 дБ относительно максимума главного лепестка (рис. 2). При этом сигнал управления не искажается и сохраняет максимальный коэффициент направленного действия по направлению своего прихода (азимут 30°).

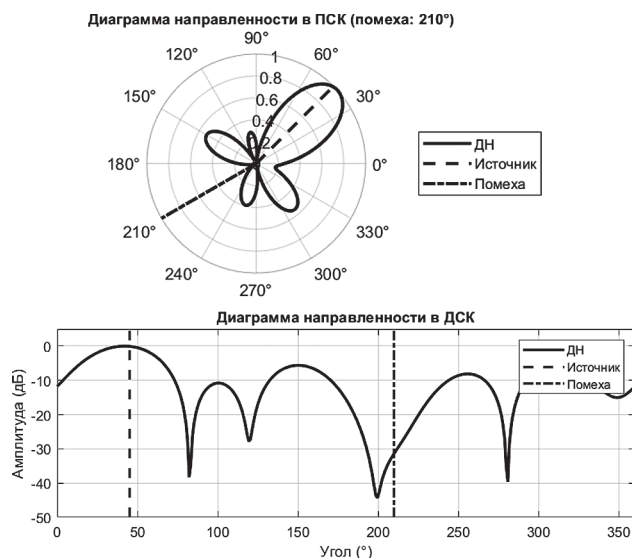


Рис. 2. Диаграмма направленности при угле прихода сигнала помехи 210°

Особый интерес представляло моделирование сложных граничных условий. При сближении пеленга помехи с направлением на полезный сигнал (например, при направлении прихода помехи 15° и направлении прихода сигнала управления с 30°), формирование

классического «глубокого нуля» становится физически невозможным из-за конечной ширины главного лепестка (определяемой апертурой антенны). В этом случае алгоритм переходит в режим компромиссной оптимизации: глубина нуля уменьшается, но уровень диаграммы направленности в направлении полезного сигнала все равно поддерживается выше, чем в направлении помехи (рис. 3). Это гарантирует сохранение связи даже при плотном сближении источников.

Наихудший теоретический результат алгоритм LMS продемонстрировал при абсолютном совпадении углов прихода помехи и полезного сигнала. В этом случае пространственное разнесение отсутствует, уровни приема совпадают, и ААР теряет способность отфильтровать помеху пространственным методом (рис. 4). Подавление в таком сценарии может быть реализовано только за счет временной или поляризационной селекции. Впрочем, на практике вероятность столь точного совпадения векторов крайне мала.

Безопорные алгоритмы: работа в условиях априорной неопределенности

Несмотря на стабильность и легкость LMS, его применение обусловлено жестким требованием – наличием в приемнике копии эталонного сигнала $d(n)$. В реальных системах, например, при внезапном воздействии РЭБ, глубоких многолучевых замираниях или в системах радиоразведки, когда параметры сигнала противника неизвестны, опорный сигнал недоступен. В таких случаях классические методы становятся

неработоспособными, что диктует переход к классу безопорных алгоритмов адаптации.

Безопорные алгоритмы базируются исключительно на статистических, пространственно-временных свойствах общего принимаемого сигнала и не нуждаются в обучающей последовательности. Основной целью таких алгоритмов является минимизация выходной мощности шумов и помех при строгом сохранении чувствительности (коэффициента передачи) антенной системы в предполагаемом направлении прихода полезного сигнала.

Среди обширного семейства безопорных методов можно выделить несколько фундаментальных направлений:

1. Алгоритмы на основе постоянства огибающей (Constant Modulus Algorithm, CMA). Используют априорную информацию о статистике модуляции полезного сигнала (например, что сигнал имеет фазовую модуляцию PSK/QAM и его амплитуда должна быть постоянной). Алгоритм штрафует любые отклонения огибающей от константы, тем самым подавляя интерференционные помехи.
2. Алгоритмы максимизации энтропии и методы высших порядков. Анализируют статистику распределения сигнала, опираясь на то, что сумма независимых сигналов (помех) стремится к гауссовскому распределению. Максимизация аномалий данного распределения позволяет выделить полезный сигнал из шума.
3. Методы подпространств. Это класс алгоритмов высокого разрешения (родственный методам MUSIC и ESPRIT). Они основаны

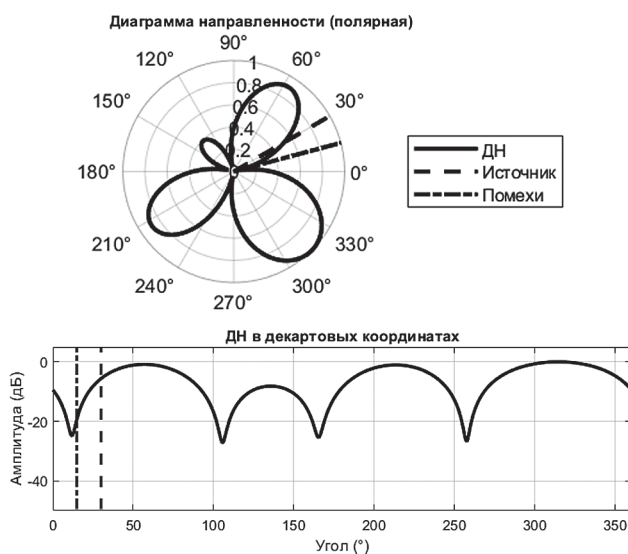


Рис. 3. Диаграмма направленности при угле прихода сигнала помехи 35°

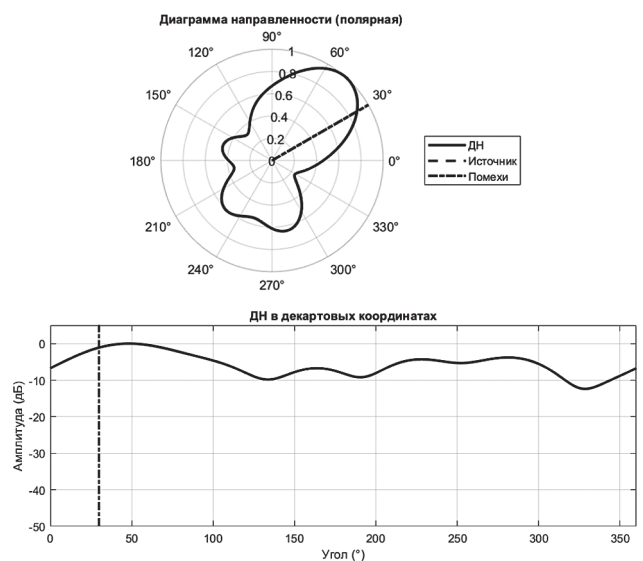


Рис. 4. Диаграмма направленности при угле прихода сигнала помехи 30°

на спектральном (сингулярном) разложении корреляционной матрицы R_{xx} на собственные векторы и собственные значения. Пространство сигналов математически разделяется на ортогональные друг другу сигнальное подпространство и шумовое подпространство. Адаптация весовых коэффициентов производится так, чтобы проекция вектора весов на шумовое подпространство была максимальной, а на помеховое – минимальной. Методы подпространств обладают феноменальной селективностью, однако спектральное разложение матрицы $O(N^3)$ критически увеличивает вычислительную нагрузку [8, 9, 10].

К наиболее распространенному и практичному классу безопорных алгоритмов относятся методы минимальной дисперсии, основанные на градиентном спуске. Адаптация весов в них осуществляется путём поэтапной корректировки вектора в направлении антиградиента выбранной функции стоимости. Благодаря относительной простоте, эти методы отлично ложатся на архитектуру ПЛИС. Результаты моделирования безопорного градиентного алгоритма в MatLab продемонстрировали устойчивую сходимость (рис. 5) и подтвердили, что геометрия решетки выступает ключевым фактором: плоские решетки сходятся быстрее линейных в условиях 3D-распределения помех.

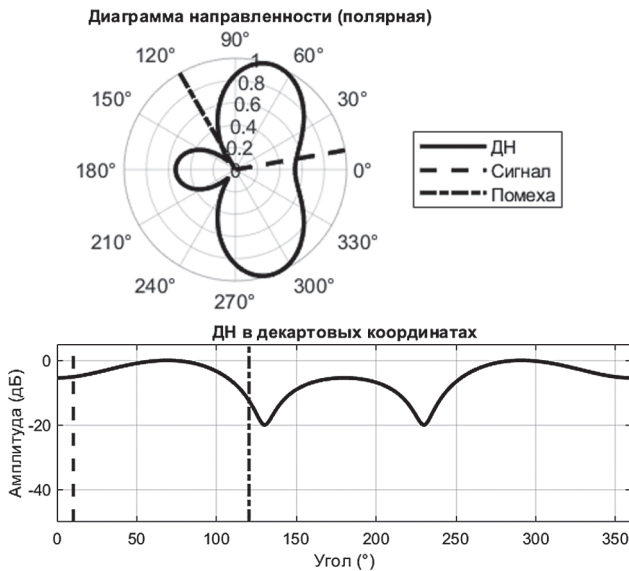


Рис. 5. Результат работы алгоритма градиентного спуска

Логическим продолжением исследования стало моделирование работы безопорной ААР в условиях сложных комбинированных помех, где эфир загрязняется несколькими мощными независимыми передатчиками с разных азимутов. Варьировались мощности источников и их угловое

распределение. Анализ показал, что увеличение количества помех усложняет многомерную топологию функции стоимости (появляются локальные минимумы) и требует применения адаптивного шага μ . Тем не менее, имитационная модель успешно продемонстрировала формирование нескольких глубоких нулей, доказав способность системы решать задачи многолучевого подавления (рис. 6).

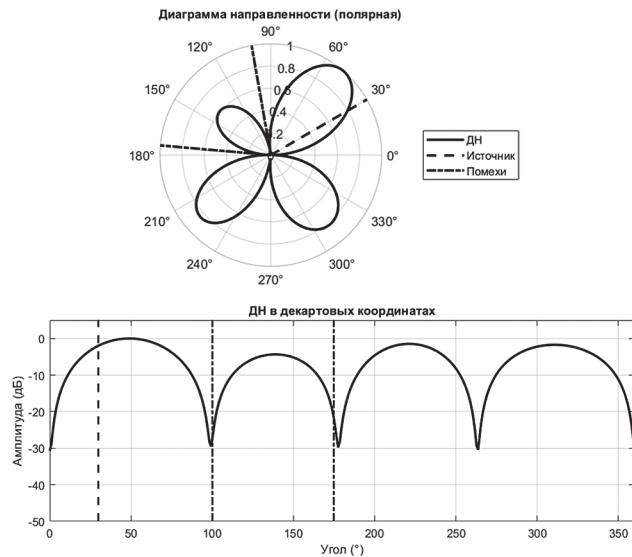


Рис. 6. Диаграмма направленности ААР при воздействии двух сигналов помех

Финальные испытания: Алгоритмы LCMV и робастный RAIS-LCMV

Завершающим этапом исследования стали финальные испытания разработанной имитационной модели в условиях стационарной многокомпонентной помеховой обстановки с применением алгоритмов класса минимальной дисперсии с линейными ограничениями – LCMV (Linearly Constrained Minimum Variance).

Математическая суть LCMV заключается в решении задачи условной оптимизации: необходимо минимизировать общую выходную мощность антенны $W^H R_{xx} W \rightarrow \min$, соблюдая при этом набор жестких линейных ограничений:

$$C^H W = f, \quad (9)$$

где C – матрица ограничений, содержащая вектор направленности на цель; f – вектор откликов (единичный, чтобы гарантировать, что сигнал с заданного направления пройдет без ослабления).

Однако у классического LCMV есть фундаментальный недостаток – возможный эффект самоподавления полезного сигнала. Если априорная информация об угле прихода полезного сигнала хотя бы на доли градуса отличается от реальной (например, из-за неточности

калибровки антенны, многолучевости или деформации корпуса носителя), алгоритм воспримет полезный сигнал как помеху и направит на него глубокий ноль.

Для преодоления этой уязвимости в модели был рассмотрен модифицированный алгоритм RAIS-LCMV (Robust Adaptive Iterative Steering LCMV). Робастность (повышенная устойчивость) в нем достигается за счет итеративной математической реконструкции фактического вектора направленности на основе анализа собственных векторов ковариационной матрицы, а также применения методов диагонального нагружения корреляционной матрицы, что сглаживает ошибки целеуказания [11, 12].

В рамках испытаний алгоритм RAIS-LCMV рассматривался как основной режим инициализации системы в стационарных условиях (до начала движения подвижного носителя ААР). В стационарном режиме отсутствует эффект Доплера и быстрая смена углов, что позволяет накопить объемную статистическую выборку, рассчитать корреляционную матрицу без искажений и выполнить итеративное уточнение вектора. Результаты испытаний со сценариями воздействия нескольких разнонаправленных помеховых станций доказали высочайшую эффективность подхода: RAIS-LCMV полностью исключил эффект самоподавления полезного сигнала, продемонстрировав предельно глубокие нули в зонах помех.

Заключение

В представленной работе был проведен всесторонний анализ алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов для цифровых адаптивных антенных решеток. Разработанная

на базе среды MatLab математическая имитационная модель позволила детально исследовать физику формирования диаграммы направленности и оценить поведение системы в сложной электромагнитной обстановке.

Доказано, что для систем, функционирующих в динамичном режиме с жесткими ограничениями на вычислительные мощности (бортовые системы БПЛА, тактические радиостанции), алгоритм стохастического градиентного спуска LMS является оптимальным выбором. Он гарантирует уверенное подавление одиночных и групповых помех с вычислительной сложностью всего $O(N)$.

С другой стороны, вскрыта проблематика априорной неопределенности, когда отсутствие опорного сигнала требует внедрения безопорных алгоритмов. Выполненный анализ методов подпространств и алгоритмов минимальной дисперсии показал их высокий потенциал, но выявил проблему критической уязвимости классического LCMV к ошибкам пеленгации (эффект самоподавления).

Успешная реализация и тестирование робастного алгоритма RAIS-LCMV предлагает элегантное решение этой проблемы. Его применение признано наиболее целесообразным для стационарных режимов инициализации радиотехнических комплексов: он с высокой точностью оценивает параметры эфира и реконструирует векторы направленности, формируя глубокие защитные барьеры-нули против сложных комбинированных помех. Синтез рассмотренных методов открывает широкие перспективы для создания гибридных, высокоинтеллектуальных систем радиосвязи и радиолокации нового поколения.

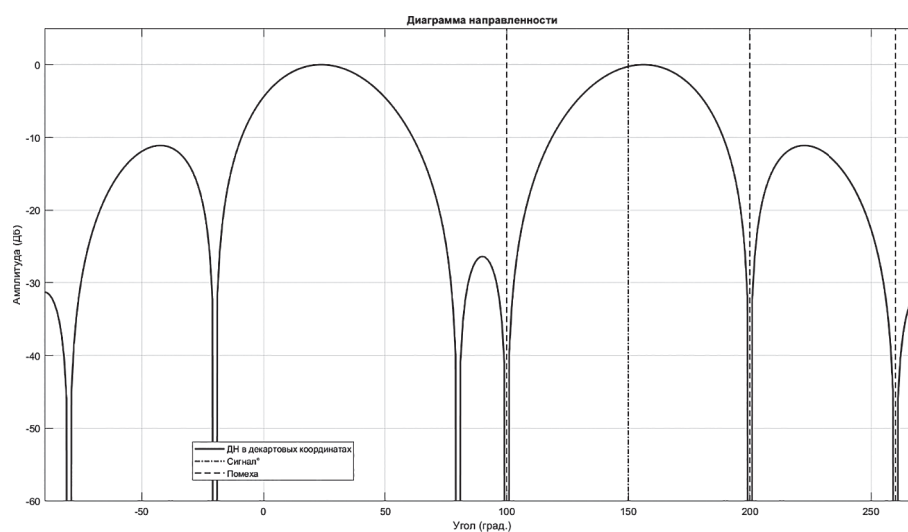


Рис. 7. Диаграмма направленности ААР при применении алгоритма RAIS-LCMV

Литература

1. Звонарев В. В., Питрин А. В., Попов А. С. Методика расчета коэффициента направленного действия адаптивной антенной решетки при наличии помех // Изв. вузов. Приборостроение, 2025. – Т. 68. – № 3. – С. 198–206.
2. An Adaptive Five-Element Array Antenna Based on Miniaturised Polarisation-Insensitive Absorptive Metamaterial for Anti-Jamming Applications / G. Wang, X. Tang, F. Huang [et al.] // IET Microwaves Antennas & Propagation, 2025. – Vol. 19. – No. 1. – P. e70056.
3. Shima, K. Data-Aided SMI Algorithm Using Common Correlation Matrix for Adaptive Array Interference Suppression / K. Shima, K. Maruta, Ch. Ju. Ahn // IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2021. – Vol. E104.A. – No 2. – Pp. 404–411.
4. Кащенко И. Е. Регуляризация RLS-алгоритма для адаптивных систем ввода цифровых предсказаний / И. Е. Кащенко, А. П. Павлов // Радиотехника, 2024. – Т. 88. – № 1. – С. 141–148.
5. An efficient normalized LMS algorithm / A. Zerguine, Ja. Ahmad, M. Moinuddin [et al.] // Nonlinear Dynamics, 2022. – Vol. 110. – No. 4. – Pp. 3561–3579.
6. Praneet R. J., Kumar C. A., Rajendra N. A novel sign variable step size LMS (SiVSS-LMS) algorithm for adaptive beamforming // CSIT, 2020. – 8 (4). – Pp. 377–384.
7. Бойко И. А., Глушанков Е. И., Лялина А. Ж. Алгоритмы адаптивной обработки сигналов в геостационарных системах // Труды учебных заведений связи, 2025. – Т. 11. – № 5. – С. 74–83.
8. Wnuk, M. Adaptive Antenna Array Control Algorithm in Radiocommunication Systems // Algorithms, 2024. – Vol. 17. – No 2. – P. 81.
9. Глушанков Е. И., Царик И. В., Царик В. И. Пространственно-распределенная технология адаптивного формирования диаграммы направленности антенной решетки // Научные известия, 2022. – № 29. – С. 165–170.
10. Чистяков В. А. Алгоритм адаптивной фильтрации помех в цифровых антенных решетках спутниковой связи // Труды МАИ, 2019. – В. 105. – С. 100–113.
11. Meng, Zh. Robust widely linear beamforming using estimation of extended covariance matrix and steering vector / Zh. Meng, W. Zhou, S. Gazor // Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2020. – Vol. 2020. – No 1. – Pp. 1–20.
12. Guo X., Chu L., Li B. Robust Adaptive LCMV Beamformer Based on an Iterative Suboptimal Solution. // Radioengineering, 2015. – Vol. 24. – No 2. – P. 572–581.

MATHEMATICAL MODEL OF THE ALGORITHM FOR ADJUSTING THE COEFFICIENTS OF THE ADAPTIVE ANTENNA ARRAY

Tsvetkov D. E.³, Fedorov P. N.⁴

Keywords: radiation pattern, spatial filtering, weight coefficients, adaptation algorithms, unsupported algorithms, subspace methods, covariance matrix, mathematical modeling, interference suppression, robustness.

Abstract

The aim of the work is to analyze and develop a mathematical model of the algorithm for adapting weight coefficients for adaptive antenna arrays (AAR), as well as to assess its effectiveness in suppressing complex spatially distributed radio interference.

The research method is mathematical and simulation modeling in the MatLab software environment, as well as methods of matrix algebra, theory of random processes and statistical radio engineering for calculating correlation matrices and weight vectors. To assess the quality of spatial filtering, a comparative analysis of the computational complexity of classical gradient methods and the selectivity of modern robust unsupported algorithms at different angular distributions of sources was used interference.

The results of the study showed that for mobile systems with severe hardware resource constraints, the least mean squares (LMS) algorithm is the most effective, which, due to linear computational complexity, provides a confident formation of deep zeros in the direction of interference sources. At the same time, it was established that under conditions of a priori uncertainty and the absence of a reference signal, classical methods lose their performance, which requires a transition to unsupported algorithms. Simulation of complex multi-component interference revealed a critical vulnerability of the standard LCMV method to direction finding errors, leading to the effect of self-rejection of the desired signal. To solve this problem, the modified robust RAIS-LCMV algorithm was successfully tested. The tests proved that its use in stationary initialization modes makes it possible to iteratively reconstruct the actual directional vector based on an in-depth analysis of the eigenvectors of the covariance matrix. This completely eliminates the effect of self-rejection and ensures that multipath deep dips are generated precisely to the sources of combined interference, while maintaining the maximum transmission ratio in the direction of the target signal.

³ **Dmitry E. Tsvetkov**, operator of the scientific company, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. St. Petersburg, Russia. E-mail: tsvetkovde123@gmail.com

⁴ **Pavel N. Fedorov**, Senior Researcher of the Research Institute-4 of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny. St. Petersburg, Russia. E-mail: fedorovpn1@yandex.ru