

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.14>

УДК: 534.6.08

АДАПТИВНЫЙ ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ЗОНДИРОВАНИЯ В АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ СВЕРХРАЗРЕШАЮЩЕЙ ПЕЛЕНГАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ПОМЕХ. ЧАСТЬ 1.

Н.П. Красненко, И.А. Рыбаков

**Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения РАН,
634055, Томск, пр. Академический, 10/3**

Статья поступила в редакцию 26 мая 2026 г.

Аннотация. В работе рассматривается задача повышения помехозащищённости акустических локаторов (сонаров), оснащённых адаптивной антенной решеткой (ААР), за счёт выбора оптимальных направлений зондирования атмосферы в условиях сложной шумовой обстановки. Показано, что в отличие от классических радиолокационных систем, направление зондирования в сонаре не является жёстко фиксированным из-за рассеяния сигнала на распределённых атмосферных неоднородностях, что позволяет дополнительно минимизировать мощность принимаемых помех. Предложен адаптивный алгоритм выбора оптимального угла излучения, основанный на анализе пространственной структуры сигнала и локализации источников активных помех. Для повышения точности оценки угловых координат источников использованы методы сверхразрешения – метод Кейпона (минимизации дисперсии) и метод многоканальной классификации MUSIC. Описаны алгоритмы оценки направлений прихода широкополосных акустических помех с разбиением спектра на частотные поддиапазоны и последующим усреднением пространственных

спектров. Приведены результаты численного моделирования для шестиэлементной линейной антенной решетки с параметрами, соответствующими реальному акустическому лолятору. Моделирование проводилось для двух широкополосных помеховых сигналов (шум авиационного двигателя и акустический шум стаи птиц) при различных отношениях помеха/шум (от 10 до 50 дБ) и угловом разнесении от 3° до 20° . На основе оценённых угловых координат помех осуществляется адаптивная перестройка диаграммы направленности антенной решётки: главный лепесток перемещается в область с минимальным уровнем помех. Полученные результаты могут быть использованы для повышения устойчивости акустических систем обнаружения и мониторинга атмосферы в условиях сложной помеховой обстановки.

Ключевые слова: содар, адаптивная антенная решетка, угловые координаты, помехи, пеленгация.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № FEWM-2023-0014 (ТУСУР).

Автор для переписки: Рыбаков Иван Андреевич, vaniarybakov98@gmail.com

Введение

Системы акустического мониторинга: зондирования атмосферы (локаторы или, как их еще называют – содары) и пассивной локации акустических источников находят широкое применение в последнее время. Содары играют ключевую роль в решении задач метеорологии, экологического мониторинга и изучения динамики воздушных масс [1,2]. Эти системы позволяют получать данные о вертикальных профилях термической структуры, скорости ветра и турбулентности, используя анализ характеристик акустических сигналов, распространяющихся в атмосфере. Также начали активно использоваться пассивные акустические обнаружители и пеленгаторы низколетящих звуковых объектов, таких как БПЛА [3,4]. Однако эффективность работы таких систем существенно снижается в условиях воздействия

помех (шумов) как искусственного, так и естественного происхождения [1]-[5]. В таких случаях критически важным становится обеспечение устойчивости работы акустических приемных систем за счет подавления помеховых сигналов.

Принципиальное отличие задачи для содара от классических радиолокационных систем заключается в том, что направление зондирования не является жестко заданным. Рассеяние акустического сигнала происходит на распределенных атмосферных неоднородностях, поэтому излучение может осуществляться в некотором диапазоне углов. Это создает возможность не только формировать нули диаграммы направленности в направлениях источников помех, но и выбирать такое направление зондирования, при котором мощность принимаемых шумов минимальна. Иначе говоря, оптимизация может осуществляться не только по весовым коэффициентам решетки, но и по самому углу излучения. В связи с этим возникает задача определения угловых координат источников помех, чтобы далее перестроить диаграмму направленности в направление, свободное от помех.

Традиционные методы пеленгации не позволяют с высокой точностью определять угловые координаты источников активных помех при помощи однопозиционной антенной системы с малой апертурой [6,7]. Точность пеленгации ограничена дифракционным пределом, который зависит от длины волны и размера апертуры антенны. Однако современные методы сверхразрешения, основанные на математических моделях и вычислительных подходах, способны существенно повысить разрешающую способность приемной системы и определять пеленг на источник помехи даже при малом угловом разнесении [8,9]. В данной работе предлагается модифицированный подход к определению угловых координат активных помех в акустических системах с ААР, сочетающий методы пространственной обработки сигнала. Акцент сделан на повышении точности оценки углов прихода помех в реальном времени, а также на устойчивости алгоритма к изменяющимся параметрам атмосферы.

Несмотря на разнообразие методов измерения, их применение сталкивается с общими проблемами. Например, большинство алгоритмов чувствительны к уровню шума и требуют высокого отношения сигнал/шум. Вычислительная сложность ограничивает их использование в реальном времени. Точность также зависит от калибровки антенных систем, а некоторые методы не могут работать с числом источников, превышающим количество элементов решетки.

Технологии сверхразрешающей пеленгации, преодолевающей классические ограничения в определении направления прихода сигнала, находят применение в широком спектре отраслей. В радиолокации и радиоастрономии они обеспечивают обнаружение объектов с экстремальной точностью, что критически важно, например, для систем космических наблюдений [10]-[12]. В гидроакустических системах методы сверхразрешения повышают детализацию подводных исследований, позволяя не только обнаруживать, но и классифицировать цели в сложных подводных условиях [13]-[15]. Космические навигационные системы, такие как GPS и ГЛОНАСС, применяют эти технологии для повышения точности геопозиционирования [16]. Методы сверхразрешающей пеленгации находят широкое применение в системах мобильной связи, особенно в условиях плотной застройки и помех [17]. Автомобильная индустрия и робототехника интегрируют сверхразрешающие радары для навигации в условиях ограниченной видимости, обеспечивая детектирование препятствий с сантиметровой точностью [18,19]. В геофизике эти методы используются для интерпретации сейсмических данных, улучшая прогнозирование тектонической активности [20,21]. В приложениях радиоконтроля алгоритмы сверхразрешения помогают идентифицировать незаконные передающие устройства даже в условиях плотного радиочастотного фона [22,23]. Комплексная оценка эффективности различных корреляционных методов пеленгации была проведена в работах [24,25], где сделан анализ методов, основанный на критериях точности, вычислительных затрат и устойчивости к помехам, а также применимости методов к работе в реальных условиях. Дополнительно исследована способность рассматриваемых

алгоритмов корректно определять истинное соотношение амплитуд пеленгуемых и разрешаемых сигналов.

Однако до сих пор все вышеупомянутые исследования и алгоритмы адаптивной пространственной фильтрации не описаны и не нашли практического применения в атмосферных акустических системах. Это создает предпосылки для приоритетной разработки пространственно-временных адаптивных методов, способных повысить помехоустойчивость акустических систем мониторинга в условиях интенсивных атмосферных помех. Ниже рассматриваются теоретические аспекты и практические подходы к реализации адаптивных методов пространственной фильтрации для акустических систем. Особое внимание уделяется алгоритмам минимизации дисперсии сигнала и многоканальной классификации сигналов. Важным аспектом является учет широкополосности помех, что характерно для работы систем атмосферного зондирования, так и локации различных объектов.

1. Теория

Использование адаптивных антенных решеток в качестве антенн акустических систем позволило перейти к принципиально новому уровню обработки сигналов, расширив традиционные методы анализа во временной и частотной областях за счет их пространственной обработки. Ключевая особенность таких систем заключается в возможности выбирать направление зондирования в диапазоне углов, а не ограничиваться фиксированным положением антенны. Анализ зависимости мощности помех от угла показывает, что для адаптивной решетки на направлениях, совпадающих с положением источников шума, будут возникать характерные спектральные пики. Во всех остальных направлениях уровень помех на выходе изменяется незначительно. Это означает, что при наличии нескольких локализованных источников шума следует избегать углов, совпадающих с их положением, тогда как остальные направления практически равноценны с точки зрения помеховой мощности. Таким образом, оптимальное направление выбирается как такое, при котором

мощность помех минимальна, или, что эквивалентно и удобнее на практике, как направление максимума отношения сигнал/помеха+шум.

Обозначим мощность помех на выходе решетки $P_n(\varphi_0)$. Оптимальное направление определяется как:

$$\varphi_{opt} = \arg \min P_n(\varphi_0). \quad (1)$$

С целью иллюстрации возможности реализации пространственной адаптации в содарах с антенными решетками рассмотрим выражение, описывающее мощность помех на выходе акустической антенны:

$$P_n(\varphi_0) = \frac{1}{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |G(\varphi, \varphi_0)|^2 \cdot P(\varphi) \cdot \cos(\varphi) d\varphi, \quad (2)$$

где φ – угол, отсчитываемый от нормали к решетке; $G(\varphi, \varphi_0)$ – нормированный множитель диаграммы направленности линейной решетки; $P(\varphi)$ – угловое распределение интенсивности внешних помех.

Как видно из (2), если направление выбрать таким образом, чтобы в точке φ_0 наблюдался минимум функции $P_n(\varphi)$, то это обеспечит минимум мощности помех на выходе антенны.

Следовательно, выбор оптимального направления фактически сводится к задаче пространственного спектрального анализа помеховой обстановки. Алгоритм относится к методам определения угловых координат и позволяет учитывать распределение источников шума в пространстве.

Для повышения точности их измерения были выбраны методы углового сверхразрешения, позволяющие преодолеть существующие ограничения, связанные с разрешающей способностью. Преимущество данных методов связано в первую очередь с достижением высоких показателей эффективности за счет математических алгоритмов и быстроедействия цифровой обработки.

На рисунке 1 показана структурная схема процесса адаптивного выбора направления зондирования с формированием диаграммы направленности антенной решетки для минимизации влияния помех. Основная цель этого

процесса – направлять главный лепесток диаграммы в такое направление зондирования, в котором мощность помех минимальна, что обеспечивает подавление нежелательных сигналов и повышение помехоустойчивости системы.

В качестве априорной информации в реализуемой схеме обработки используются угловые координаты помеховых источников. Эти данные позволяют адаптивному алгоритму точно настраивать веса W элементов антенной решетки, формируя диаграмму направленности антенны с оптимальными характеристиками.

На схеме отдельно выделены блоки, которые отвечают за пеленгацию помеховых составляющих в пространстве. Эти блоки выполняют функцию оценки направления прихода помеховых сигналов и передачи этой информации в алгоритм адаптации. Благодаря этому формируются нули диаграммы направленности в направлениях помех, что минимизирует их воздействие на работу акустической системы.

Помехи S поступают на элементы антенной решетки и после оцифровки формируют наблюдаемые сигналы $x(k)$. На их основе строится ковариационная матрица R и с помощью направляющих векторов $A(\varphi)$ рассчитывается пространственный спектр $P(\varphi)$. Пики спектра соответствуют угловым координатам помех. Далее, на основании этой информации, вычисляются весовые коэффициенты W , которые перемножаются с входными сигналами $x(k)$ для дальнейшей перестройки диаграммы направленности. После взвешивания производится суммирование сигналов, что соответствует формированию отклика антенной решетки в заданном направлении. Таким образом, схема демонстрирует два ключевых этапа работы адаптивного диаграммообразования:

- 1) пеленгации помеховых сигналов, т.е. определения их пространственных координат (выделено на схеме);

- 2) адаптивной настройки диаграммы направленности антенны, т.е. формирования оптимальной ДН при помощи весовых коэффициентов W с учетом априорной информации о помехах, полученной на первом этапе.

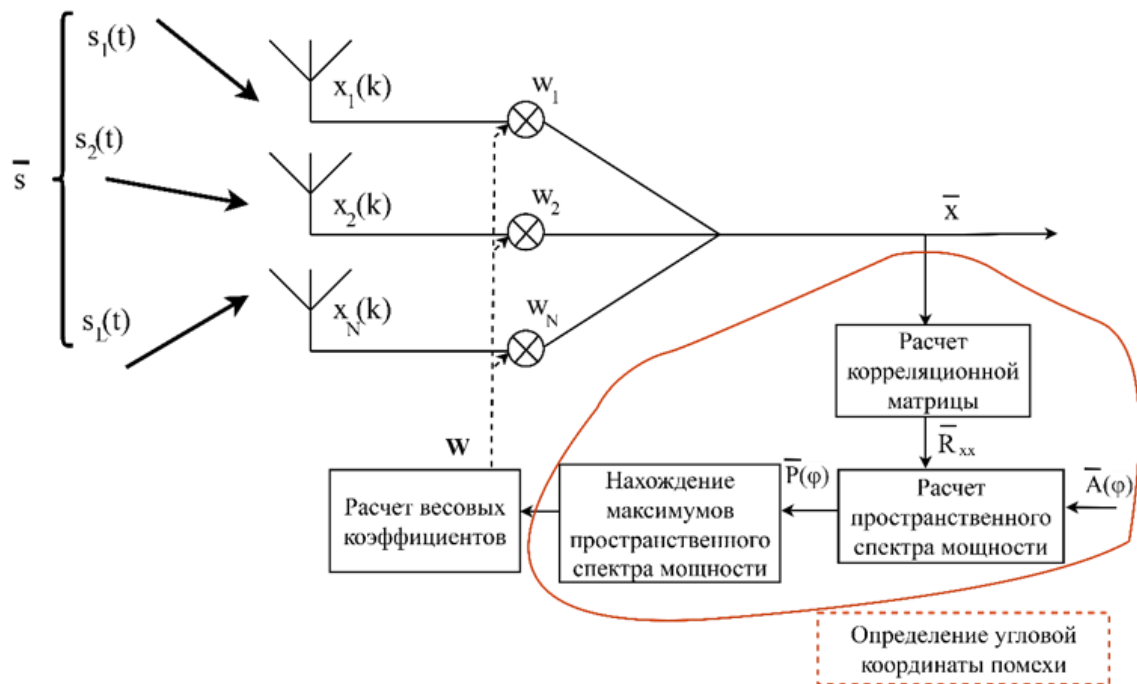


Рис. 1. Реализация алгоритма пространственной обработки сигнала в адаптивной антенной решетке.

На сегодняшний день имеется большое количество алгоритмов, реализующих сверхразрешение по угловым координатам. Для приложения к акустике были выбраны непараметрические методы, а именно: метод многоканальной классификации (Multiple signal classification, сокр. MUSIC) и метод Кейпона (метод минимального отклонения или минимизации дисперсии шума) [20]. Непараметрические методы строят оценку углов через анализ пространственного спектра и не требуют знаний о структуре сигнала. Данные методы не имеют ограничений на геометрию антенной системы.

Для упрощения математических выкладок предположим, что имеется эквидистантный линейный массив, состоящий из N элементов на который поступают плоские фронты волн, излученные L источниками. Угловая координата источника излучения характеризуется составляющей φ , определяющей угол прихода волны по отношению к оси решетки. Вектор сигнала с выхода элементов антенной решетки в дискретной форме можем представить в виде:

$$X(k) = A(\varphi)S(k) + n(k), \quad (3)$$

где $A(\varphi) = [a(\varphi_1), a(\varphi_2), \dots, a(\varphi_L)]$ – вектор, задающий направление прихода сигнала на антенную решетку; $a(\varphi_L) = [1, \exp(j\omega d \sin \varphi_L), \dots, \exp(j\omega(N-1)d \sin \varphi_L)]$ – для линейной решетки с шагом d и частотой ω ; $S(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_L(k)]$ – сигнал от L -ого источника в k -ый момент времени.

Тогда получаем матрицу направляющих векторов размерностью $N \times L$, где количество столбцов будет равно количеству источников излучения:

$$A(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{(i\omega d \sin \varphi_1)} & e^{(i\omega d \sin \varphi_2)} & \dots & e^{(i\omega d \sin \varphi_L)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{(i\omega(N-1)d \sin \varphi_1)} & e^{(i\omega(N-1)d \sin \varphi_2)} & \dots & e^{(i\omega(N-1)d \sin \varphi_L)} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Получаем матрицу цифровых отсчетов сигналов от L источников акустического излучения размерностью $L \times K$:

$$s(k) = \begin{bmatrix} s_1(k_1) & s_1(k_2) & \dots & s_1(k_K) \\ s_2(k_1) & s_2(k_2) & \dots & s_2(k_K) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_N(k_1) & s_N(k_2) & \dots & s_N(k_K) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где K – количество временных отсчетов; $n(k)$ – вектор отсчетов шума с N элементов решетки в k -ый момент времени.

Все приведенные ниже алгоритмы работают с корреляционной матрицей сигнала, формируемой из K цифровых отсчетов, которую можно вычислить как:

$$R = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x(k_i) \cdot x^H(k_i), \quad (6)$$

где H – оператор эрмитового сопряжения.

В матричном форме:

$$R = \begin{bmatrix} \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x(k_1) \cdot x^H(k_1) & \cdots & \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x(k_1) \cdot x^H(k_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x(k_N) \cdot x^H(k_1) & \cdots & \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x(k_N) \cdot x^H(k_N) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Особенностью принимаемых сигналов, помех, шумов в атмосферной акустике является их широкополосный характер [1,4], что значительно усложняет обработку [24]. Основная сложность алгоритма обработки сигнала в антенной решетке заключается в том, что параметры принимаемого сигнала, такие как задержка и фаза, зависят от частоты, а значит одна и та же угловая координата может соответствовать разным задержкам сигнала на разных частотах.

Для решения задачи необходимо измерить сигнал в каждом приемном канале решетки во временной области или представить его в частотной области, выделить параметры задержек и фазовых сдвигов для каждой частоты, а затем объединить полученную информацию для оценки угловых координат. Существует подход, при котором широкий спектр сигнала разбивается на несколько узкополосных поддиапазонов, для каждого из которых применяется традиционный узкополосный метод, а затем результаты объединяются.

При реализации метода возникает ряд проблем: необходимо правильно выбрать ширину и количество частотных поддиапазонов, чтобы сохранить точность оценки углов прихода помеховых составляющих. Вычислительная сложность возрастает по сравнению с узкополосными алгоритмами. В итоге, задача определения координат широкополосного сигнала сводится к адаптации классических узкополосных методов для работы с многочастотными сигналами, используя специализированные алгоритмы широкополосного сверхразрешения, которые эффективно учитывают всю спектральную информацию и обеспечивают более высокую разрешающую способность.

Выбор метода для оценки угловых координат источника акустической помехи представляет собой сложный процесс, требующий анализа множества взаимосвязанных факторов. Эти факторы включают характеристики сигнально-помеховой обстановки, конфигурацию антенной решетки: ее геометрические параметры и количество антенных элементов. Каждый из этих аспектов вносит свои ограничения и возможности, которые необходимо учитывать для достижения оптимальной точности и эффективности алгоритмов.

Метод Кейпона один из самых зарекомендовавших себя способов сверхразрешения сигналов. В алгоритме используется аналогия частотного и пространственного спектров. Алгоритм хорошо показывает себя только при высоких отношениях сигнал/шум, что не сделало его особо популярным в задачах радиолокации и радиомониторинга. Но в задачах пеленгации акустических помех, уровень которых во много порядков превышает внутренние шумы приемного устройства, данный способ полностью себя оправдывает.

Пространственный (угловой) спектр принятого сигнала по методу Кейпона [20] определяется, как:

$$P(\varphi) = \frac{1}{A(\varphi)R^{-1}A^H(\varphi)}. \quad (8)$$

Одно из основных преимуществ метода Кейпона это то, что он не требует априорного знания числа источников излучения, а опирается только на знание корреляционной матрицы входных сигналов.

Последовательность работы по данному методу:

- 1) Находим оценку ковариационной матрицы входных значений помеховых составляющих;
- 2) Вычисляем пространственный спектр распределения мощности помех по угловым направлениям;
- 3) По максимумам пространственного спектра находим направления на источники помех.

При использовании метода многоканальной классификации (метода MUSIC) требуются, помимо вычисления корреляционной матрицы, ее разложения

на собственные вектора и собственные числа с последующим выделением подпространств сигнала и шума.

Алгоритм вычислений в данном случае работает следующим образом:

1) Получаем корреляционную матрицу:

$$R = R_{\text{сигнала}} + R_{\text{шума}}. \quad (9)$$

2) Вычисляем собственные значения корреляционной матрицы и собственный вектор корреляционной матрицы для каждого собственного значения:

$$R = U_c \Lambda_c U_c^H + U_{ш} \Lambda_{ш} U_{ш}^H, \quad (10)$$

где Λ_c и $\Lambda_{ш}$ – диагональные матрицы собственных значений сигналов и фонового шума, U_c и $U_{ш}$ – матрицы собственных векторов, которые соответствуют собственным значениям;

3) Выделяется подпространство шума:

$$E_{ш} = U_{ш} U_{ш}^H. \quad (11)$$

4) Вычисляется пространственный спектр принимаемых помех по формуле:

$$P(\varphi) = \frac{1}{A(\varphi) E_{ш} E_{ш}^H A^H(\varphi)} \quad (12)$$

5) По максимумам пространственного спектра находим направления на источники помех.

До этого момента мы оперировали тем, что количество источников помех было известно априори. В реальных же условиях число источников неизвестно, что не позволяет разделить матрицу собственных векторов на помеховое и сигнальное подпространства без предварительной оценки размерности этих пространств [27]. Поэтому ошибки определения числа источников помехового

излучения критичны и приводят либо к потере целей, либо к появлению ложных пиков.

Процедура оценивания числа источников подробно будет рассматриваться во второй части серии статей и включать применение методов, основанных на анализе собственных значений ковариационной матрицы наблюдений. В частности, будут обсуждаться информационные критерии, такие как AIC и MDL, позволяющие определить оптимальную размерность сигнального подпространства. Алгоритмы сводятся к последовательной проверке гипотез о числе источников с последующим выбором значения, минимизирующего соответствующий критерий. При этом будут учитываться влияние уровня помехи, числа выборки и углового разнесения сигналов, что напрямую будет отражаться на достоверности оценки и устойчивости дальнейших процедур пространственной обработки.

2. Результаты моделирования

В рамках данного исследования проводилось моделирование сценария, требующего определения угловых координат источников помеховых сигналов. Акустическая система не излучает сигналы, а работает только в пассивном режиме, осуществляя прием исключительно внешних сигналов.

Исходными параметрами для выполнения моделирования были выбраны: число активных источников излучения, частота дискретизации принимаемых сигналов, объем выборки сигнальных отсчетов, углы прихода сигналов относительно нормали к антенной решетке, расстояние между элементами антенной решетки, количество приемных элементов в решетке, а также задавалось отношение помеха/шум в приемных каналах.

Моделирование проводилось для 6 элементной антенной решетки, представленной ранее в работе [28]. В качестве антенных элементов были применены пьезокерамические преобразователи звука ПЭП-3. Данные электроакустические преобразователи обладают высокой интенсивностью звука, а их конструкция обеспечивает защиту от неблагоприятных климатических

воздействий. Межэлементное расстояние в решетке составляет 5,2 см, а резонансная частота излучения (приема) 3150 Гц.

На антенную решетку одновременно подавались два широкополосных сигнала на основе реальных аудиозаписей записей, в качестве которых использовались шум работающего авиационного двигателя и акустический шум стаи птиц. Спектральные плотности мощности указанных помех приведены на рисунке 2. Отношения помеха/внутренний шум указывалось равными 30 и 20 дБ. Частота дискретизации устанавливалась равной 10 кГц, продолжительность приемной реализации составляла 1 секунду.

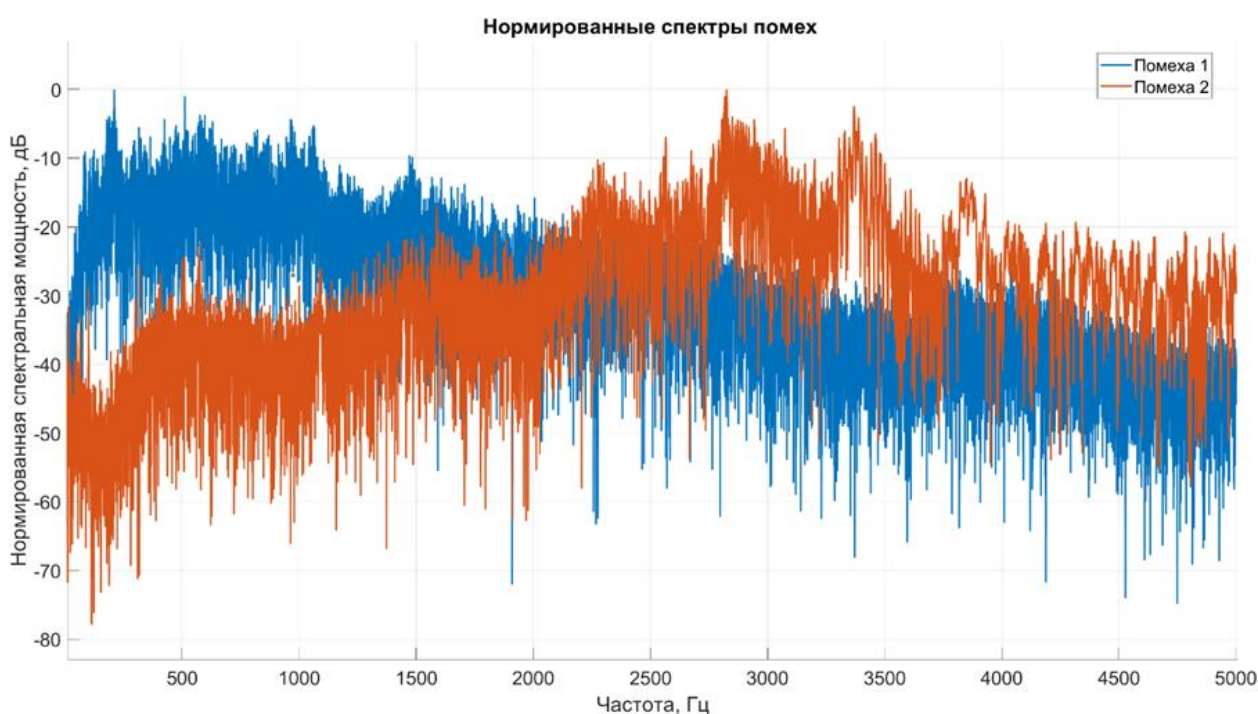


Рис. 2. Спектральные плотности мощности авиационного шума двигателя и пения птиц.

При разделении на частотные поддиапазоны использовалась цифровая оконная функция Хэмминга. Для определения ширины поддиапазона был выбран размер окна быстрого преобразования Фурье равный 128 точкам. Таким образом, $10000 \text{ Гц}/128 \approx 78 \text{ Гц}$ составляет ширину каждого поддиапазона широкополосного сигнала. В процессе моделирования уровень помеха/шум от каждого источника излучения и их угловое разнесение варьировались. Под шумом понимался внутренний белый гауссовский шум приемной системы

с равномерной спектральной плотностью мощности. Полоса частот для анализа выбирается в диапазоне 2750-3550 Гц. Такой выбор обусловлен резонансной частотой излучающих элементов, что в принципе, является типовым значением для акустических локаторов. В активном режиме работы системы доплеровский сдвиг отраженного сигнала определяется радиальной скоростью воздушного потока и может быть оценен по классическому соотношению доплеровского эффекта. Для частоты зондирования 3150 Гц смещение спектра в пределах ± 400 Гц соответствует радиальной скорости порядка 37 м/с, что можно рассматривать как экстремально высокое значение скорости ветра, потенциально наблюдаемое в атмосфере. Таким образом, выбранный диапазон соответствует граничным условиям функционирования доплеровского акустического локатора и охватывает максимально возможные доплеровские отклонения частоты при интенсивных динамических воздействиях среды.

Следует отметить, что в настоящей работе рассматривается пассивная система, в которой отсутствует собственный зондирующий сигнал, а анализу и пеленгации подвергаются исключительно помеховые составляющие. Тем не менее выбор указанной полосы частот сохраняет физическую обоснованность, поскольку она соответствует рабочему диапазону типовой активной системы.

Структурная схема работы алгоритмов сверхразрешения представлена на рисунке 3.

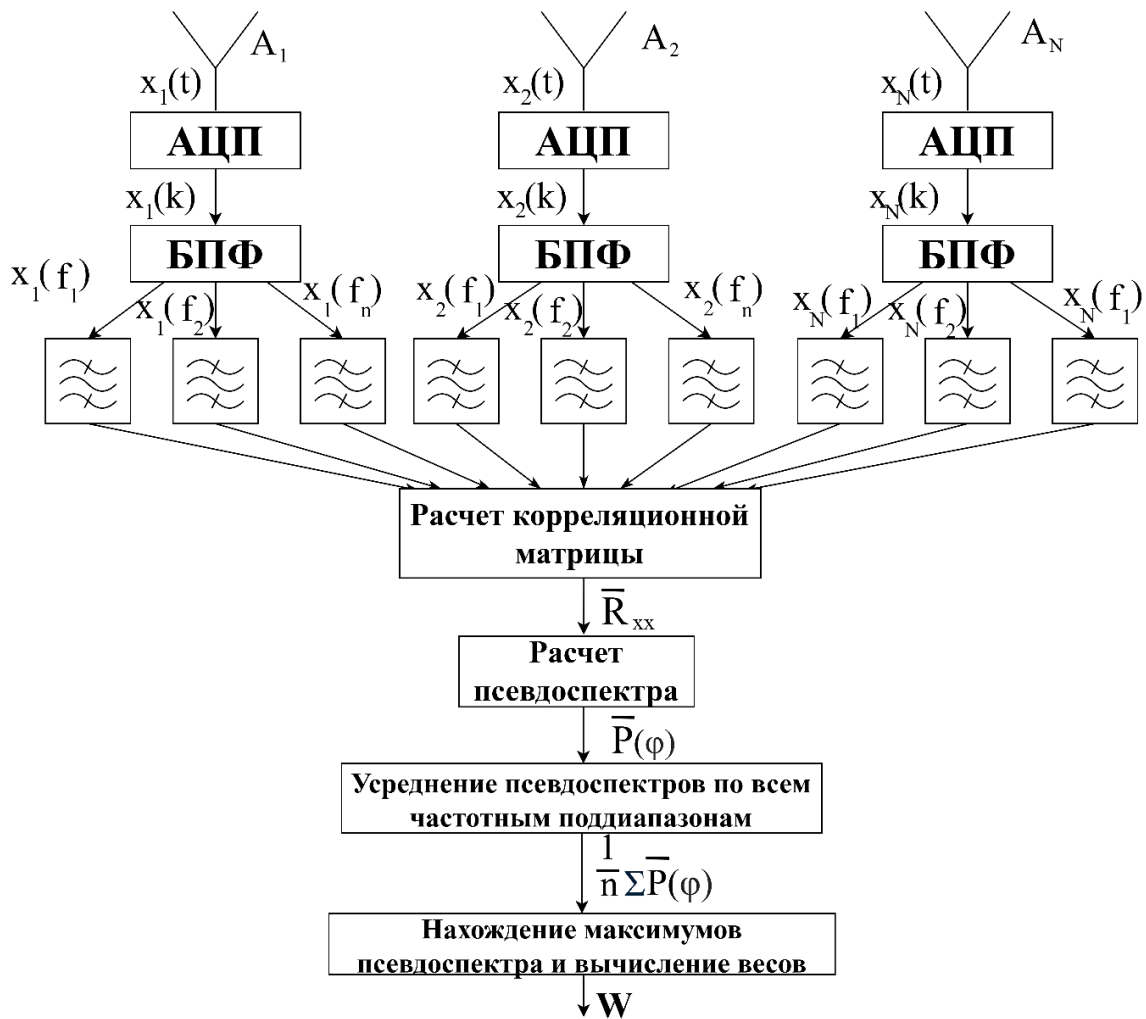


Рис. 3. Структурная схема широкополосной системы сверхразрешения по угловым координатам.

При помощи операции быстрого преобразования Фурье (БПФ) широкая полоса частот сигнала делится на n поддиапазонов, каждый из которых можно рассматривать как узкополосный спектр. Для каждого поддиапазона вычисляется пространственная корреляционная матрица сигналов, после чего строится пространственный спектр. Затем спектры для всех поддиапазонов усредняются, формируя итоговый пространственный спектр мощности, который впоследствии служит априорной информацией для вычисления весовых коэффициентов W .

На рисунках 4-7 представлены результаты моделирования для различных помеховых условий.

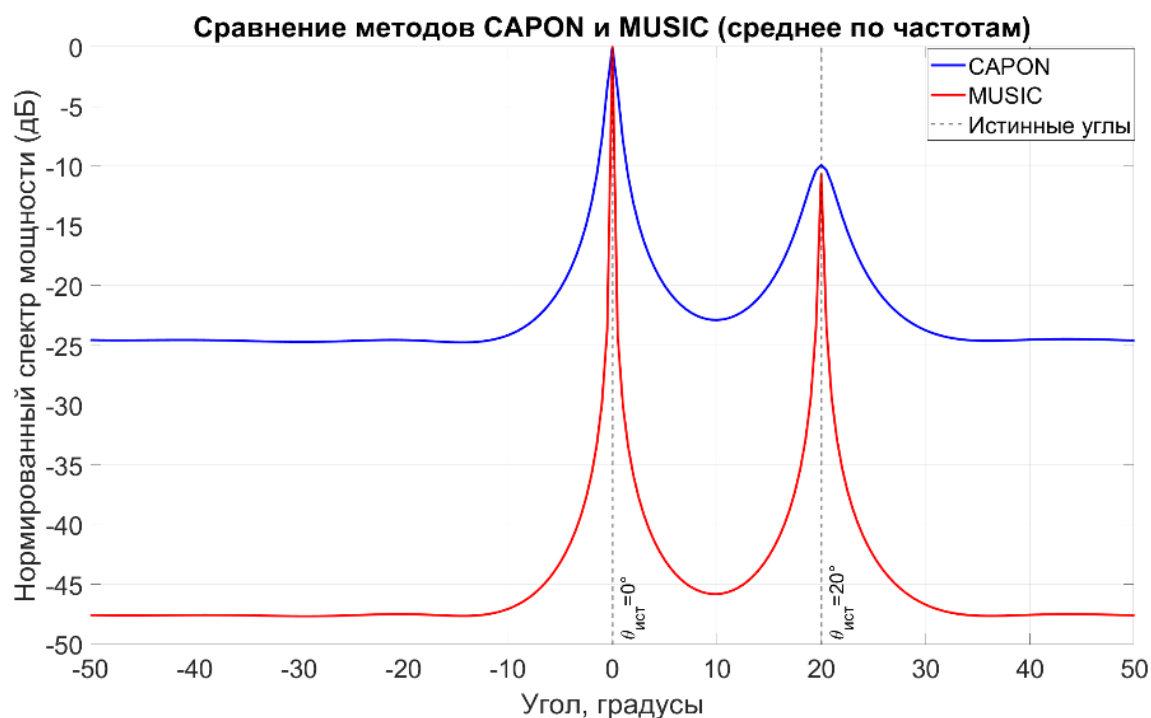


Рис. 4. Пространственные (угловые) спектры сигнала антенной решетки, полученные методами Кейпона и MUSIC. Отношение помеха /внутренний шум помеховых источников соответственно 20 и 10 дБ, угловое разнесение между ними 20°.

Результаты демонстрируют высокую эффективность обоих методов в решении задачи оценки углового положения источников излучения. Оба подхода обеспечили стабильное определение направления источников излучения. Критерий оценки эффективности, установленный на уровне -5 дБ, основывается на разности уровней мощности между вершинами пиков и «седловиной». Критерий указывает, насколько отчетливо один пик отделяется от другого и был выбран как компромисс между точностью пеленгации и устойчивостью к ложным срабатываниям.

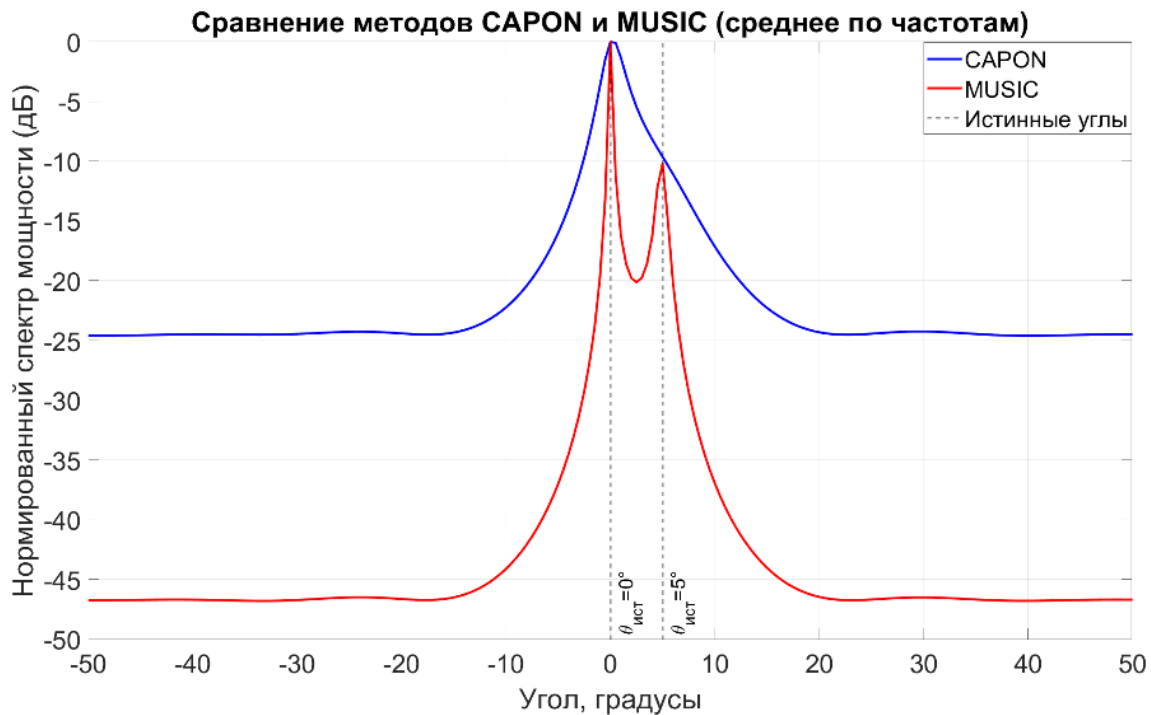


Рис. 5. Пространственные (угловые) спектры сигнала антенной решетки, полученные методами Кейпона и MUSIC. Отношение помеха /внутренний шум помеховых источников соответственно 20 и 10 дБ, угловое разнесение между ними 5° .

При уменьшении углового расстояния между источниками излучения до 5° (рисунок 5) метод Кейпона, демонстрирует принципиальное ограничение в разрешающей способности. Видно, что более мощный сигнал формирует ярко выраженный и доминирующий спектральный пик. В то же время менее интенсивная помеха проявляется гораздо слабее и зачастую может быть частично затенена или даже вовсе не выделена на фоне более сильного источника излучения. Это связано с физическими ограничениями метода, зависящими от количества элементов антенной решетки и отношения уровня сигнала и шума. Интересно, что в аналогичном сценарии алгоритм MUSIC, использующий разложение сигнального подпространства, сохраняет способность к разрешению источников.

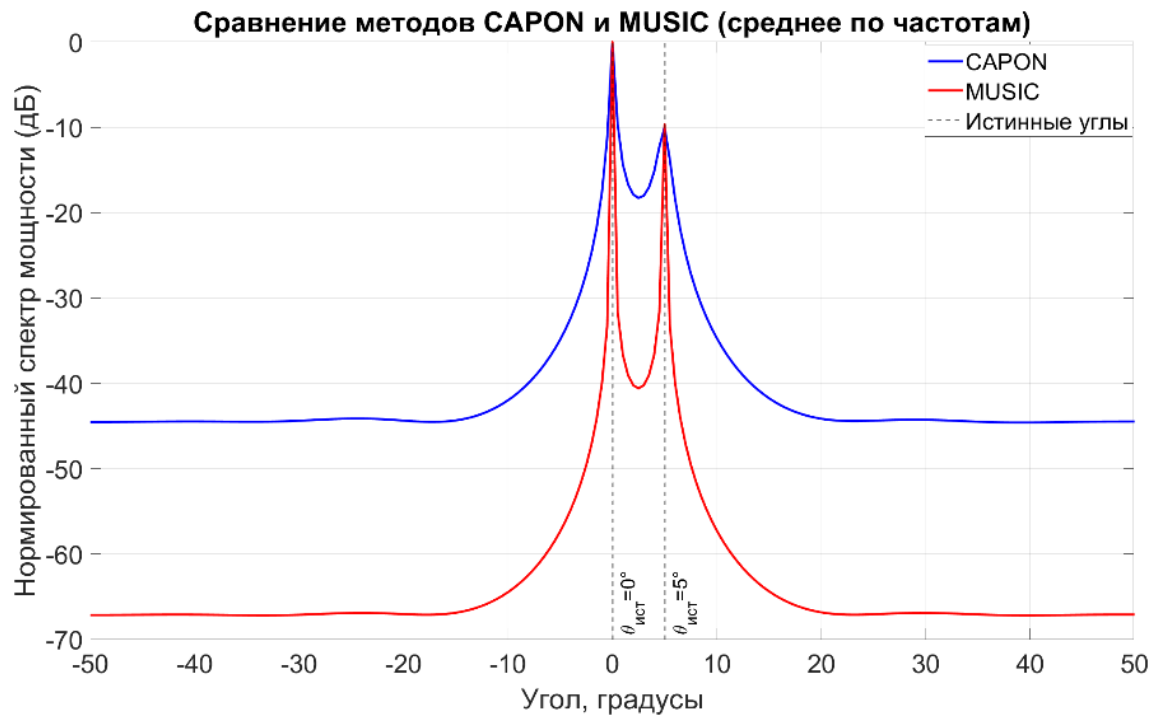


Рис. 6. Пространственные (угловые) спектры сигнала антенной решетки, полученные методами Кейпона и MUSIC. Отношение помеха /внутренний шум помеховых источников соответственно 40 и 30 дБ, угловое разнесение между ними 5° .

После повышения отношения помеха/шум от источников излучения, соответственно до 40 и 30 дБ отчетливо видно (рисунок 6), как увеличение уровня помехи отражается на форме спектра: пиковые значения становятся более выраженными и контрастными, что облегчает процесс выявления и разделения источников.

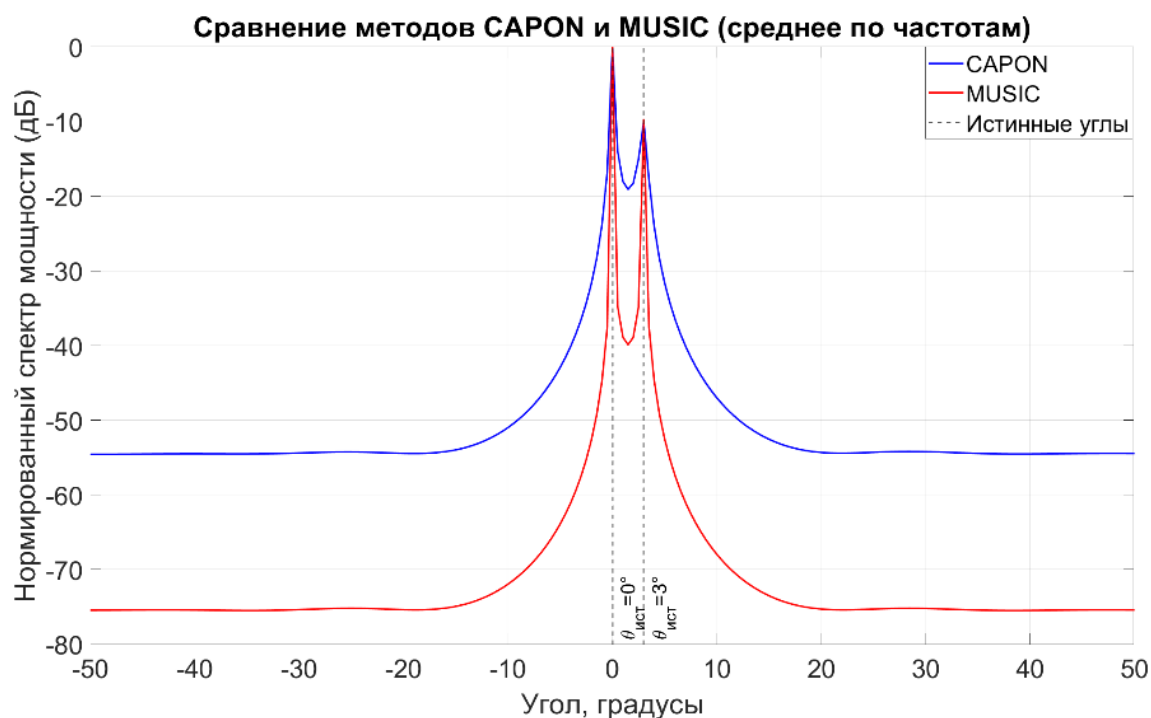


Рис. 7. Пространственные (угловые) спектры сигнала антенной решетки, полученные методами Кейпона и MUSIC. Отношение помеха /внутренний шум помеховых источников соответственно 50 и 40 дБ, угловое разнесение между ними 3° .

При дальнейшем увеличении отношений помеха/шум от источников до 50 и 40 дБ сигналы могут быть различимы даже при угловом разнесении в 3° (рисунок 7). Оба метода показывают ярко выраженные спектральные пики. Разрешающая способность обоих методов зависит от отношения помеха/шум, что, в свою очередь, определяется уровнями мощностей источников излучения. Метод MUSIC по сравнению с методом Кейпона обладает большей разрешающей способностью. Однако, предварительная оценка размерности сигнального и шумового подпространств, а также разложение корреляционной матрицы, обусловлены повышенной вычислительной сложностью метода.

Следует отметить различие в характере пространственных спектров сигналов при использовании анализируемых методов. В случае метода Кейпона оценка спектра формируется на основе минимизации выходной мощности антенной решетки при условии сохранения усиления в направлении предполагаемого источника. Такой подход позволяет эффективно подавлять другие направления, при этом спектральная оценка носит энергетический

характер. В результате при построении спектра сохраняются боковые лепестки, отражающие остаточную энергию в подавляемых направлениях.

В отличие от этого, метод MUSIC основан на разделении пространства собственных векторов корреляционной матрицы на сигнальное и шумовое подпространства. Ортогональность векторов направленности истинных источников к шумовому подпространству приводит к резкому росту спектра только в точках прихода источников сигнала, тогда как для остальных направлений значения оказываются существенно подавленными. Благодаря этому боковые лепестки в спектре MUSIC значительно ниже, чем в спектре Кейпона (порядка 20 дБ), что обеспечивает более выраженные и узкие пики.

Для демонстрации работы алгоритма задавались параметры источников сигнала. Число источников выбрано равным 4. Истинные угловые координаты источников задавались как -50° , 0° , 25° , 40° , а уровень помеха/внутренний для каждого источника – соответственно 30, 20, 25, 15 дБ. Эти параметры использовались для оценки эффективности оптимального направления формирования диаграммы направленности и оценки угла прихода помеховых составляющих. На рисунках 8 и 9 представлены пространственные (угловые) спектры сигнала антенной решетки и диаграмма направленности (зеленым цветом) в неоптимизированном и оптимизированном направлении зондирования.

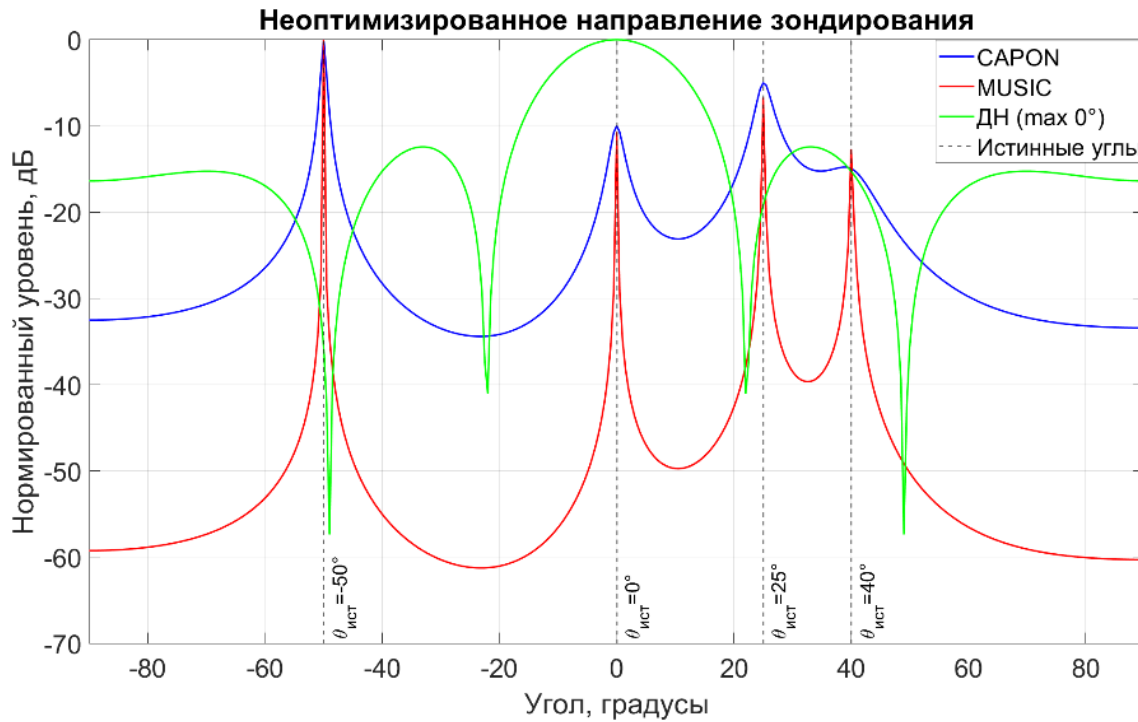


Рис. 8. Пространственные (угловые) спектры сигнала антенной решетки и диаграмма направленности в неоптимизированном направлении зондирования.

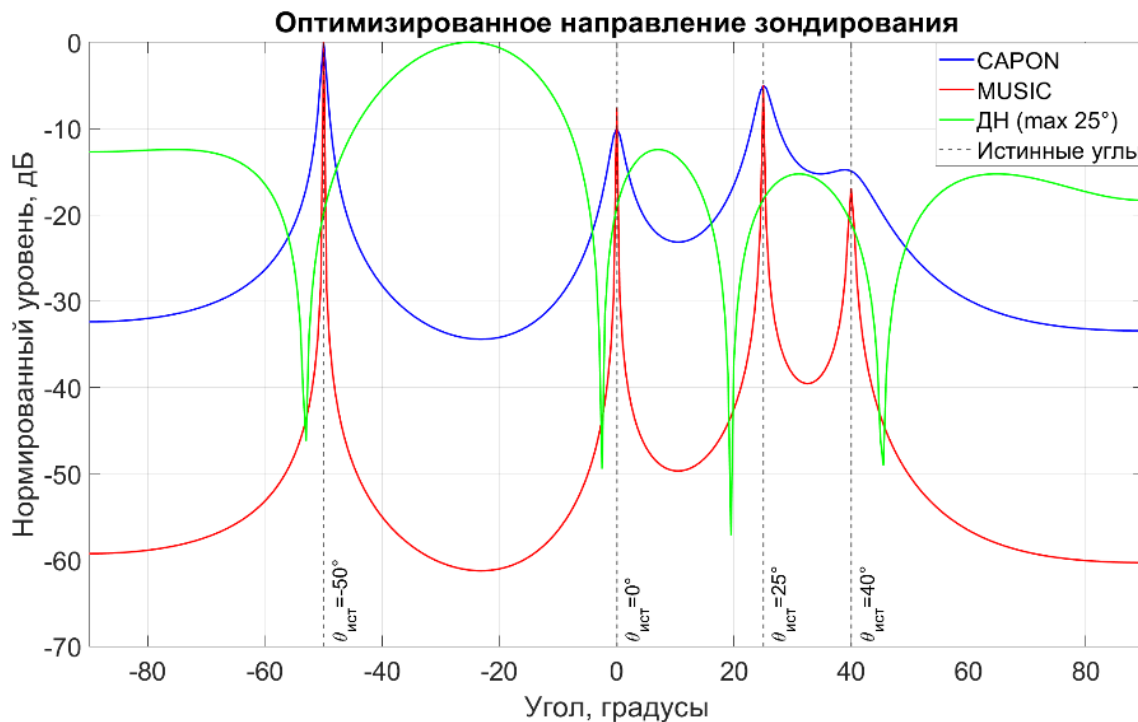


Рис. 9. Пространственные (угловые) спектры сигнала антенной решетки и диаграмма направленности в оптимизированном направлении зондирования.

На основании представленных иллюстраций можно сделать вывод о характере изменения пространственной направленности антенной системы при использовании предложенного алгоритма. В исходном состоянии максимум диаграммы направленности располагается в области углов, соответствующих

одному из выраженных максимумов помеховой составляющей пространственного спектра. Такое совпадение приводит к тому, что основная лепестковая область диаграммы направленности ориентирована в сторону источника помех, что, в свою очередь, приводит к ухудшению условий приема полезного сигнала и снижению эффективности зондирования.

После применения разработанного алгоритма происходит адаптивная перестройка диаграммы направленности антенной решетки. В результате максимум основной лепестковой области смещается в угловую область, свободную от выраженных помеховых максимумов пространственного спектра. Таким образом, формируется направление зондирования, в котором влияние помеховых источников существенно ослаблено. Перенаправление максимума диаграммы направленности в область с минимальным уровнем помех обеспечивает более благоприятные условия приема и обработки сигналов, что приводит к повышению эффективности зондирования и улучшению характеристик системы в целом. Такой подход позволяет реализовать оптимальный выбор направления формирования диаграммы направленности с точки зрения минимизации влияния помеховых составляющих и повышения качества принимаемой информации.

Дополнительно следует отметить особенности формы полученной диаграммы направленности. На представленных иллюстрациях можно наблюдать относительно широкий основной луч. Такая характеристика обусловлена выбранной конфигурацией антенной решетки, которая ориентирована на применение в компактных системах акустического зондирования, в частности в мини-содарах. В подобных системах, как правило, используется ограниченное число излучающих и принимающих элементов, что связано с требованиями к компактности, энергопотреблению и конструктивной простоте устройства. Небольшое количество элементов антенной решетки приводит к увеличению ширины основного лепестка диаграммы направленности.

При этом следует подчеркнуть, что рассматриваемый алгоритм оптимизации направления формирования диаграммы направленности

не зависит принципиально от конкретной размерности антенной решетки и может быть применен для более крупных конфигураций антенных массивов. При увеличении числа элементов антенной решетки ширина основного луча уменьшается, что приводит к повышению углового разрешения и более точному формированию требуемого направления зондирования. Таким образом, предложенный алгоритм обладает хорошей масштабируемостью и может эффективно использоваться как в компактных системах зондирования, так и в более крупных антенных конфигурациях с большим числом элементов.

Заключение

Применение технологий сверхразрешения в комбинации с антенными решетками обеспечивает выделение полезного сигнала за счет значительного повышения точности определения угловых координат мешающих активных помех в акустических системах мониторинга, преодолевая классический предел Рэлея. Это открывает возможности для оптимизации направления формирования диаграмм направленности антенн, что критически важно для повышения эффективности работы акустических систем в атмосфере. Преобладающий уровень внешних помех над внутренними шумами в таких системах позволяет работать с большими отношениями помеха/шум, что, в свою очередь, обеспечивает высокую эффективность функционирования методов пеленгации.

В представленной работе решается задача повышения помехозащищенности акустических систем мониторинга атмосферы, функционирующих в условиях сложной и динамичной помеховой обстановки. Идея исследования заключается в отказе от классического подхода с фиксированным направлением зондирования и переходе к адаптивному выбору угла излучения на основе анализа пространственной структуры внешних помех. Предложен алгоритм выбора оптимального направления зондирования. Данный подход позволяет минимизировать мощность принимаемых помех на этапе выбора угла излучения. Это стало возможным благодаря физической особенности содаров – рассеянию сигнала на распределенных неоднородностях, что допускает зондирование

в некотором диапазоне углов. Показано, что оптимальным является направление, соответствующее минимуму мощности помех на выходе антенной решетки.

На сегодня не существует универсального метода, оптимального для всех сценариев работы систем. Выбор подхода, его сильные и слабые стороны зависят от геометрии антенной решетки, конфигурации системы, а также доступных априорных данных о характеристиках помех. Для работы в атмосфере наиболее перспективными представляются алгоритмы многоканальной классификации (метод MUSIC) и метод Кейпона, демонстрирующие высокую эффективность в условиях изменчивой помеховой обстановки.

Актуальность применения методов сверхразрешения и адаптации в системах атмосферного акустического мониторинга обусловлена необходимостью повышения помехоустойчивости систем.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № FEWM-2023-0014 (ТУСУР).

Литература

1. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. - Томск: Водолей, 2001. - 278 с.
2. Bradley S. Atmospheric acoustic remote sensing: principles and applications. – CRC press, 2007.
3. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография //СПт: Научные технологии. – 2020.
4. КРАСНЕНКО Н. П., РЫБАКОВ И. А., РАКОВ А. С. АКУСТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ НИЗКОЛЕТЯЩИХ ДРОНОВ // АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. – 2024. – Т. 70. – №. S5. – С. 21. - <https://doi.org/10.34756/GEOS.2024.17.38817>
5. Crescenti G. H. Degradation of Doppler Sodar Performance Due to Noise //NASA. – 1997. – №. 19980005391.
6. Van T. et al. Detection estimation and modulation theory //Detection, Estimation, and Filtering Theory. – Wiley & Sons, Inc., 2013.

7. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – Радио и связь, 2003.
8. Tuncer T. E., Friedlander B. (ed.). Classical and modern direction-of-arrival estimation. – Academic Press, 2009.
9. Гейбриел У. Ф. Спектральный анализ и методы сверхразрешения с использованием адаптивных решеток //ТИИЭР. – 1980. – Т. 68. – №. 6. – С. 19.
10. Вербa В.С., Меркулов В.И., Чернов В.С. Методы и алгоритмы углового оценивания со сверхразрешением для авиационных бортовых радиолокационных систем // Успехи современной радиоэлектроники. - 2021. - Т. 75, N 11. - С. 27-42. - <https://doi.org/10.18127/j20700784-202111-04>
11. Ильчук А. Р. и др. Угловое сверхразрешение в бортовых радиолокационных системах воздушного базирования //Журнал радиоэлектроники. – 2021. – Т. 12. - <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.12.3>
12. Abdulkareem A., Alnajjar S. H. Improvement of DOA estimation utilizing super resolution and iterative super resolution MUSIC algorithms //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2025. – Т. 3211. – №. 1. – С. 070010. - <https://doi.org/10.1063/5.0257870>
13. Малышкин Г. С., Сидельников Г. Б. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов (обзор) //Акустический журнал. – 2014. – Т. 60. – №. 5. – С. 526-526. - <https://doi.org/10.7868/S0320791914050098>
14. Малышкин Г. С., Тимофеев В. Н., Туркалова О. И. Разрешение и оценка параметров слабых сигналов при наличии мешающих источников в зоне Френеля с помощью современных адаптивных алгоритмов //Акустический журнал. – 2013. – Т. 59. – №. 4. – С. 520-520. - <https://doi.org/10.7868/S0320791913040114>
15. Сазонтов А.Г., Смирнов И.П. Локализация источника в случайно-неоднородном канале с использованием многогранового алгоритма Кейпона // Акустический журнал. - 2021. - Т. 67, N 6. - С. 659-667. - <https://doi.org/10.31857/S0320791921060101>

16. Чистяков В. А. Система мониторинга угловых координат источников радиоизлучения для космических аппаратов спутниковой связи //Труды МАИ. – 2019. – №. 109. – С. 15. - <https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-15>
17. Шмонин О.А., Купцов В.В., Трушков С.Н. [и др.] Применение сверхразрешающего метода MUSIC в фазированных антенных решетках для пеленгации источников случайных сигналов // Радиотехника. - 2024. - Т. 88, N 12. - С. 89-102. - <https://doi.org/10.18127/j00338486-202412-08>
18. Артюхин И. В. и др. Алгоритм оценки углов прихода сигналов в системе распределенных некогерентных автомобильных радаров //Журнал радиоэлектроники. – 2023. – Т. 4. – С. 1-20. - <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.4.2>
19. Xu S., Wang J., Yarovoy A. Super resolution DOA for FMCW automotive radar imaging //2018 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). – IEEE, 2018. – С. 1-4. - <https://doi.org/10.1109/CAMA.2018.8530609>
20. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis //Proceedings of the IEEE. – 1969. – Т. 57. – №. 8. – С. 1408-1418 - <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7278>
21. Harris D. B., Kvaerna T. Superresolution with seismic arrays using empirical matched field processing //Geophysical Journal International. – 2010. – Т. 182. – №. 3. – С. 1455-1477. - <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04684.x>
22. Шевченко М. Е. и др. Интервальное и точечное пеленгование источников радиоизлучения при широкополосном радиомониторинге //Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 23. – №. 6. – С. 28-42. - <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-6-28-42>
23. Давыденко А. С., Попов Е. Н., Цикин И. А. Пеленгация высокодинамичных объектов на основе метода MUSIC при использовании антенных решеток с малым числом элементов //Радиотехника. – 2020. – Т. 84. – №. 12. – С. 5-16. - [https://doi.org/10.18127/j00338486-202012\(24\)-01](https://doi.org/10.18127/j00338486-202012(24)-01)

24. Литвинов О. С. и др. Сравнение эффективности применения корреляционных методов пеленгации и разрешения источников сигналов //Антенны. – 2020. – №. 5. – С. 32-41. - <https://doi.org/10.18127/j03209601-202005-04>
25. Мюнье Ж., Делиль Ж. Ю. Пространственный анализ в пассивных локационных системах с помощью адаптивных методов //ТИИЭР. – 1987. – Т. 75. – №. 11. – С. 21.
26. Azimi-Sadjadi M. R., Pezeshki A., Roseveare N. Wideband DOA estimation algorithms for multiple moving sources using unattended acoustic sensors //IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2009. – Т. 44. – №. 4. – С. 1585-1599. - <https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4667733>
27. Манохин Г. О., Гельцер А. А., Рогожников Е. В. Увеличение разрешающей способности радиолокационной системы за счёт параметрических методов обработки сигналов //Вестник СибГУТИ. – 2015. – №. 1 (29). – С. 15-23.
28. Красненко Н.П., Рыбаков И.А., Раков А.С. Реализация электронного управления лучом в акустической антенной решетке // Электронные средства и системы управления: материалы докладов Международной научно-практической конференции. - 2023. - N 1-1. - С. 27-29.

Для цитирования:

Красненко Н.П., Рыбаков И.А. Адаптивный выбор направления зондирования в акустических системах на основе сверхразрешающей пеленгации источников помех. Часть 1. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.14>