DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.5
УДК: 534.6.08

Адаптивный выбор направления зондирования в акустических системах на основе сверхразрешающей пеленгации источников помех. Часть 2

Н.П. Красненко, И.А. Рыбаков

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, Томск

Статья поступила в редакцию 7 августа 2026 г.

Аннотация. Работа посвящена исследованию разрешающей способности методов сверхразрешающей пеленгации (Кейпона и MUSIC) применительно к задаче локализации широкополосных акустических помех в системах атмосферного мониторинга. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения помехозащищенности содаров, функционирующих в условиях интенсивного техногенного и природного шума. Проведен анализ зависимости основных показателей качества пеленгования – глубины провала между пиками пространственного спектра и минимального разрешаемого углового расстояния – от отношения помеха/внутренний шум, длительности входной реализации и количества элементов антенной решетки. Моделирование выполнялось с использованием реальных записей акустических помех. Полученные количественные зависимости позволяют обоснованно выбирать параметры системы и алгоритм пеленгации в зависимости от конкретной помеховой обстановки. Работа является продолжением первой части, в которой был предложен общий подход к адаптивному выбору направления зондирования на основе пеленгации источников помех.

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

Эффективность акустических систем мониторинга атмосферы (содаров) в значительной степени определяется их помехозащищенностью, особенно в условиях интенсивного техногенного и природного шума [1,2]. Применение адаптивных антенных решеток открывает возможность не только подавлять помехи путем формирования нулей диаграммы направленности, но и выбирать такое направление зондирования, при котором мощность принимаемых внешних помех минимальна.

В первой части [3] серии данной публикации был предложен общий подход к адаптивному выбору направления зондирования на основе сверхразрешающих методов пеленгации (Кейпона и MUSIC), а также описана структура антенной решетки. Показано, что ключевую роль в реализации данного подхода играет точность оценки угловых координат источников помех.

Применимость алгоритмов сверхразрешения для решения акустических задач верифицирована в ряде исследований. Так, в работах [4-6] показана возможность достижения высокого разрешения при построении акустических изображений на фоне интенсивных помех. В гидроакустике [7-8] продемонстрирована эффективность данных методов в условиях сложной помеховой обстановки, а также при обработке широкополосных сигналов. Совокупность этих факторов обусловливает перспективность их адаптации для задач атмосферной и метеорологической акустики. Несмотря на результаты в перечисленных областях, вопросы применения данных методов в системах акустического зондирования атмосферы (содарах) остаются не исследованы.

Несмотря на описанные в первой работе [3] алгоритмы, остаются неясными вопросы количественной оценки зависимости углового разрешения от отношения помеха/внутренний шум, длительности входной реализации (времени накопления) и количества элементов антенной решетки. Целью данной работы является восполнение этого пробела путем имитационного моделирования, а также выработка практических рекомендаций по применению рассмотренных методов в системах акустического мониторинга.

Кроме того, поскольку эффективность метода MUSIC напрямую зависит от корректности предварительной оценки числа помеховых источников (размерности сигнального подпространства), в работе отдельно исследуется надежность информационных критериев AIC и MDL, применяемых для этой цели, в зависимости от тех же факторов – уровня помех, длительности выборки и углового расстояния между источниками.

1. Теория

1.1 Основные положения методов углового сверхразрешения

Подробный вывод и описание методов Кейпона (минимизации дисперсии) и MUSIC (многоканальной классификации) применительно к задаче пеленгации источников узкополосных сигналов представлены в первой части [3]. Здесь мы ограничимся итоговыми выражениями для пространственного (углового) спектра, которые непосредственно используются в дальнейшем анализе.

Для линейной эквидистантной антенной решетки из N элементов пространственный спектр по методу Кейпона [9,10] определяется как:

$$P(\varphi) = \frac{1}{A(\varphi) R^{-1} A^{H}(\varphi)}, \tag{1}$$

где $\boldsymbol{R}$ – оценка корреляционной матрицы входных сигналов, $\mathbf{A}(\varphi)$ – направляющий вектор решетки, соответствующий углу прихода φ, H – знак эрмитова сопряжения.

Пространственный спектр метода MUSIC [11-13] строится на основе разложения корреляционной матрицы на сигнальное и шумовое подпространства:

$$P(\varphi) = \frac{1}{A(\varphi) E_{ш} E^{H}{}_{ш} A^{H}(\varphi)}, \quad (2)$$

где $E_{ш}$ – матрица, составленная из собственных векторов, соответствующих шумовым собственным числам корреляционной матрицы.

Оба алгоритма обеспечивают высокую разрешающую способность, однако их эффективность в реальных условиях определяется способностью обрабатывать широкополосные сигналы, а также зависит от ряда факторов, исследуемых в настоящей работе.

1.2 Обработка широкополосных сигналов

В большинстве задач атмосферной акустики присутствующие в среде помехи обладают выраженным широкополосным характером [1, 14]. Это обстоятельство приводит к определенным трудностям при использовании классических методов пространственной обработки сигналов, разработанных преимущественно для узкополосных моделей сигналов. В частности, для широкополосных сигналов фазовые соотношения между откликами элементов антенной решетки становятся функцией частоты, что нарушает предположение о постоянстве фазовых задержек и усложняет формирование пространственного спектра.

Одним из эффективных подходов к обработке широкополосных сигналов является их представление в виде совокупности узкополосных компонент. Практически это реализуется путем разложения исходного сигнала на ряд частотных поддиапазонов (субполос), внутри которых сигнал может рассматриваться как квазистационарный и узкополосный. Для каждой субполосы выполняется независимая пространственная обработка, после чего результаты интегрируются – например, посредством усреднения или взвешенного суммирования пространственных спектров. Такой подход

позволяет корректно учитывать частотную зависимость и повышает устойчивость алгоритмов пеленгации широкополосных источников [15,16].

Структурная схема обработки приведена на рисунке 1. Принятые сигналы с выходов N элементов решетки подвергаются дискретизации с частотой 10 кГц. Далее с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) с окном Хэмминга длиной 128 отсчетов сигнал разделяется на частотные поддиапазоны шириной приблизительно 78 Гц. Для каждого k-го частотного поддиапазона ($k = 1,\ldots, K$) по имеющейся временной выборке формируется оценка корреляционной матрицы $R(f_k)$ и вычисляется пространственный спектр $P_{fk}(\varphi)$ согласно (1) или (2).

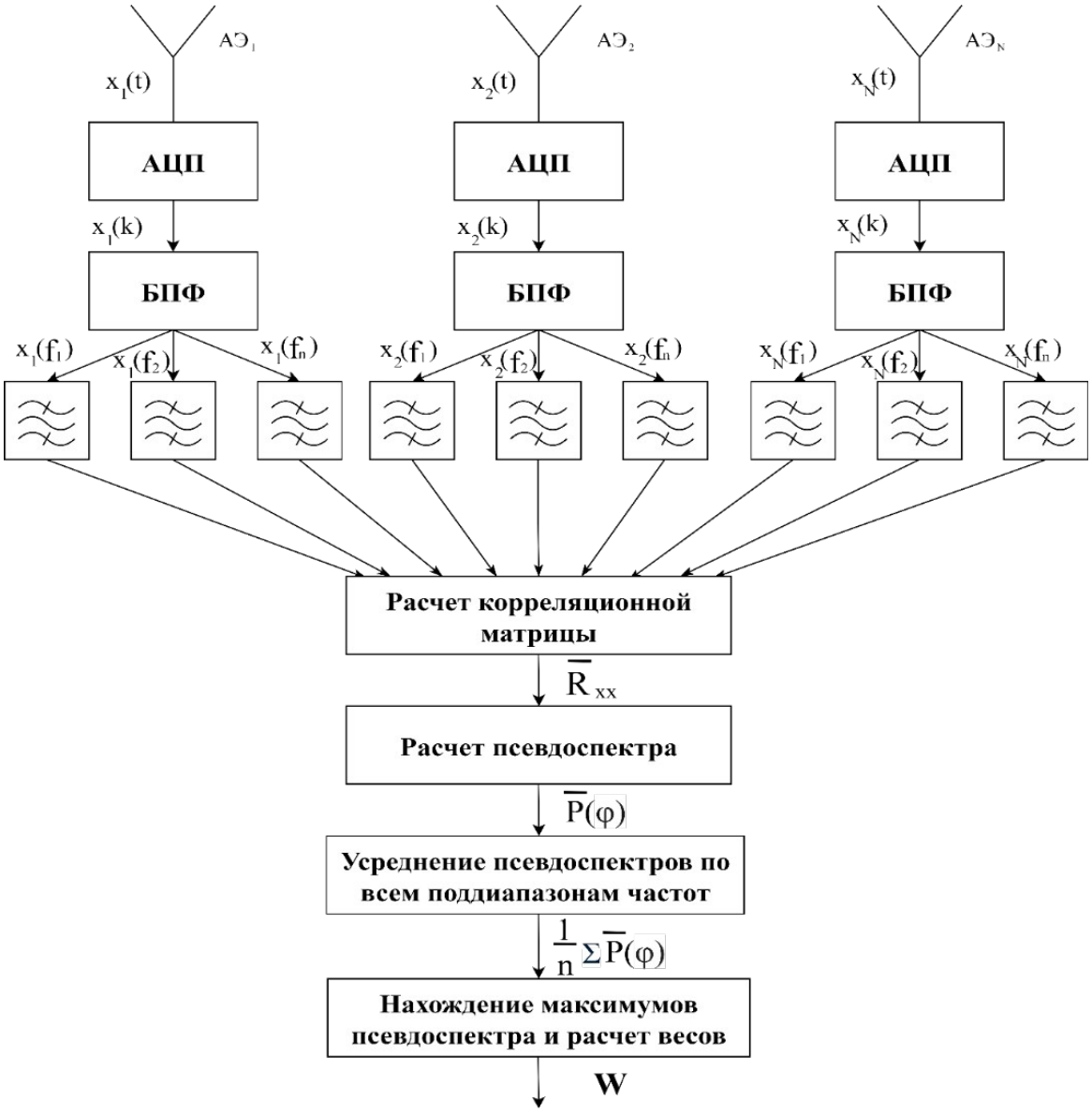


Рис. 1. Структурная схема широкополосной системы сверхразрешения по угловым координатам.

Итоговый пространственный спектр получается путем усреднения по всем частотным поддиапазонам анализируемого диапазона:

$$P_{\sum}(\varphi) = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} P_{fk}(\varphi). \quad (3)$$

Выбор анализируемого частотного диапазона 2750–3550 Гц обусловлен резонансной частотой используемых пьезокерамических преобразователей (3150 Гц) и учетом максимально возможных доплеровских сдвигов частоты (до ±400 Гц, что соответствует радиальной скорости ветра до 37 м/с) при работе активного содара. Хотя в настоящей работе рассматривается пассивный режим пеленгации помех, указанная полоса сохраняет физическую обоснованность, так как соответствует рабочему диапазону типовой активной системы.

1.3 Метрики оценки разрешающей способности

Для количественной оценки эффективности рассматриваемых алгоритмов пространственной обработки сигналов вводятся две ключевые метрики: глубина провала между пиками пространственного спектра и минимальное разрешаемое угловое расстояние. Выбор именно этих параметров обусловлен их непосредственным влиянием на достоверность обнаружения нескольких источников, находящихся в пределах основного лепестка диаграммы направленности антенной решетки.

Глубина провала ΔP (в децибелах) является мерой контрастности спектральной оценки. Количественно она определяется как разность между средним арифметическим уровнем двух максимумов, соответствующих истинным направлениям на источники, и уровнем локального минимума, расположенного между ними. Физически достаточная глубина провала свидетельствует о том, что алгоритму удалось эффективно разделить сигнальное и шумовое подпространства (в случае метода MUSIC) или сформировать весовые векторы, обеспечивающие высокую пространственную селективность (в случае метода Кейпона). Иными словами, качество оценки корреляционной матрицы и ортогональность ее компонентов напрямую определяют величину ΔP.

Чем больше значение ΔP, тем выше контрастность спектра и тем надежнее различаются близко расположенные источники при заданном отношении помеха/шум (ОПШ).

Минимальное разрешаемое угловое расстояние $\Delta\varphi_{\min}$ является интегральным показателем предельного разрешения алгоритма. Под этой величиной понимается наименьшее угловое разнесение двух некоррелированных источников равной интенсивности, при котором глубина провала в результирующем пространственном спектре составляет не менее какого-либо значения. В настоящее время не существует единого универсального критерия, однозначно определяющего порог разрешения источников [17]. В связи с этим в данной работе был принят критерий различения, равный 5 дБ провала между пиками. Он обеспечивает разумный баланс между вероятностью корректного разрешения двух близко расположенных источников и вероятностью ложного обнаружения пиков, обусловленных флуктуациями шума. Использование данного критерия позволяет перейти от субъективной визуальной оценки спектров к строгой количественной характеристике.

Практическая значимость работы заключается в исследовании поведения этих метрик в зависимости от ряда факторов. Анализ зависимостей ΔP и $\Delta\varphi_{\min}$ от отношения помеха/внутренний шум (где под помехой понимается внешний акустический сигнал, а под шумом – внутренний белый гауссовский шум приемных каналов), от длительности входной реализации (времени накопления, влияющего на точность оценки корреляционной матрицы) и от числа элементов в антенной решетке позволяет выработать практические рекомендации по применению методов Кейпона и MUSIC в системах акустического мониторинга атмосферы. Это, в свою очередь, дает возможность оптимизировать конфигурацию измерительной системы под конкретные задачи.

1.4 Оценка размерности сигнального подпространства

Как отмечалось выше, зависимости ΔP и $\Delta\varphi_{\min}$ для метода MUSIC, рассмотренные в предыдущих разделах, предполагают, что размерность сигнального подпространства d известна заранее. На практике d неизвестно и должно оцениваться по данным, поэтому надежность такой оценки является самостоятельным фактором, ограничивающим применимость метода MUSIC в реальных системах акустического мониторинга атмосферы.

Вышеописанных алгоритм MUSIC, основанный на разложении пространства наблюдений на сигнальное и шумовое подпространства, демонстрирует высокую эффективность при оценке направлений прихода сигналов лишь при условии корректного указания числа источников, задающего размерность сигнального подпространства. Ошибка на данном этапе неизбежно приводит к искажению пространственного спектра и, как следствие, к снижению точности пеленгации.

В связи с этим возникает необходимость в отдельном исследовании методов оценки модельного порядка, в частности информационных критериев AIC и MDL, которые используются для определения числа источников на основе анализа собственных значений корреляционной матрицы. Проводился их количественный анализ с точки зрения вероятности правильного оценивания числа источников в зависимости от уровня помех, длительности выборки и углового расстояния между источниками, что позволит обосновать выбор подхода к определению размерности сигнального подпространства для последующего применения алгоритма MUSIC.

Пусть наблюдаемый векторный процесс описывается как сумма сигналов и шума, а на основе выборки формируется оценка ковариационной матрицы. Обозначим через $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_M$ собственные значения этой матрицы, где M – размерность наблюдений. Предполагается, что первые d собственных значений соответствуют сигналам, а оставшиеся $M - d$ – шуму.

Для оценки числа источников d широко применяются информационные критерии, основанные на принципе максимального правдоподобия и штрафе за сложность модели [18].

Критерий Акаике (AIC) определяется как:

$$AIC(d) = -2\ln L(d) + 2k(d), \tag{4}$$

где $L(d)$ – функция правдоподобия модели с d источниками, $k(d)$ – число параметров модели. В задаче оценки числа источников этот критерий может быть записан через собственные значения ковариационной матрицы [19]:

$$AIC(d) = -2N(M-d)\ln\left(\frac{\left(\prod_{i=d+1}^{M}\lambda_i\right)^{\frac{1}{M-d}}}{\frac{1}{M-d}\sum_{i=d+1}^{M}\lambda_i}\right) + 2d(2M-d), \tag{5}$$

где N – число отсчетов.

Минимум AIC по d дает оценку числа источников. Данный критерий склонен к переоценке числа источников, особенно при малом объеме выборки.

Критерий минимальной длины описания (MDL), предложенный Риссаненом, имеет более строгий штраф за сложность модели [18]:

$$MDL(d) = -N(M-d)\ln\left(\frac{\left(\prod_{i=d+1}^{M}\lambda_i\right)^{\frac{1}{M-d}}}{\frac{1}{M-d}\sum_{i=d+1}^{M}\lambda_i}\right) + \frac{1}{2}d(2M-d)\ln N. \tag{6}$$

В отличие от AIC, критерий MDL является состоятельным, то есть при увеличении числа наблюдений он сходится к истинному числу источников. Однако при малых выборках MDL может недооценивать число сигналов.

Оценка вероятности правильного определения числа источников $P\left(\hat{d}=d\right)$ для каждой комбинации параметров (ОПШ, длительность реализации, угловое расстояние) производилась методом Монте-Карло [20] по $N_{\text{исп}} = 1000$ независимым реализациям помехового сигнала и шума приемных каналов.

Для каждой реализации формировалась оценка корреляционной матрицы, вычислялись ее собственные значения, после чего по критериям AIC и MDL определялось значение $\hat{d}$. Вероятность правильного определения оценивалась как доля реализаций, для которых $\hat{d}$ совпало с истинным числом источников d.

Таким образом, AIC и MDL представляют собой компромисс между точностью аппроксимации и сложностью модели. На практике часто используется совместный анализ обоих критериев для повышения надежности оценки числа источников.

Наряду с зависимостями ΔP и $\Delta\varphi_{\min}$ от параметров системы, важной характеристикой практической применимости метода MUSIC является вероятность корректного определения числа источников с помощью критериев AIC и MDL. Далее в разделе «Результаты моделирования» представлены как зависимости глубины провала и минимального углового расстояния для методов Кейпона и MUSIC при известном d, так и оценки вероятности правильного определения d критериями AIC и MDL. Совместно эти результаты формируют полную картину факторов, определяющих практическую эффективность сверхразрешающей пеленгации в задаче адаптивного выбора направления зондирования.

2. Результаты моделирования

Для количественной оценки разрешающей способности методов Кейпона и MUSIC в условиях широкополосных помех было проведено имитационное моделирование. В качестве антенной системы использовался 6-элементный массив на основе пьезокерамических преобразователей ПЭП-3 с межэлементным расстоянием 5,2 см и резонансной частотой 3150 Гц [21]. Параметры моделирования: частота дискретизации 10 кГц, длительность реализации 1 с (если не оговорено иное), в качестве помеховых сигналов использовались записи шума авиационного двигателя и пения птиц со спектральными плотностями мощности, приведенными на рисунке 2.

Анализируемый частотный диапазон составлял 2750–3550 Гц. Под уровнем шума понимался внутренний белый гауссовский шум приемных каналов.

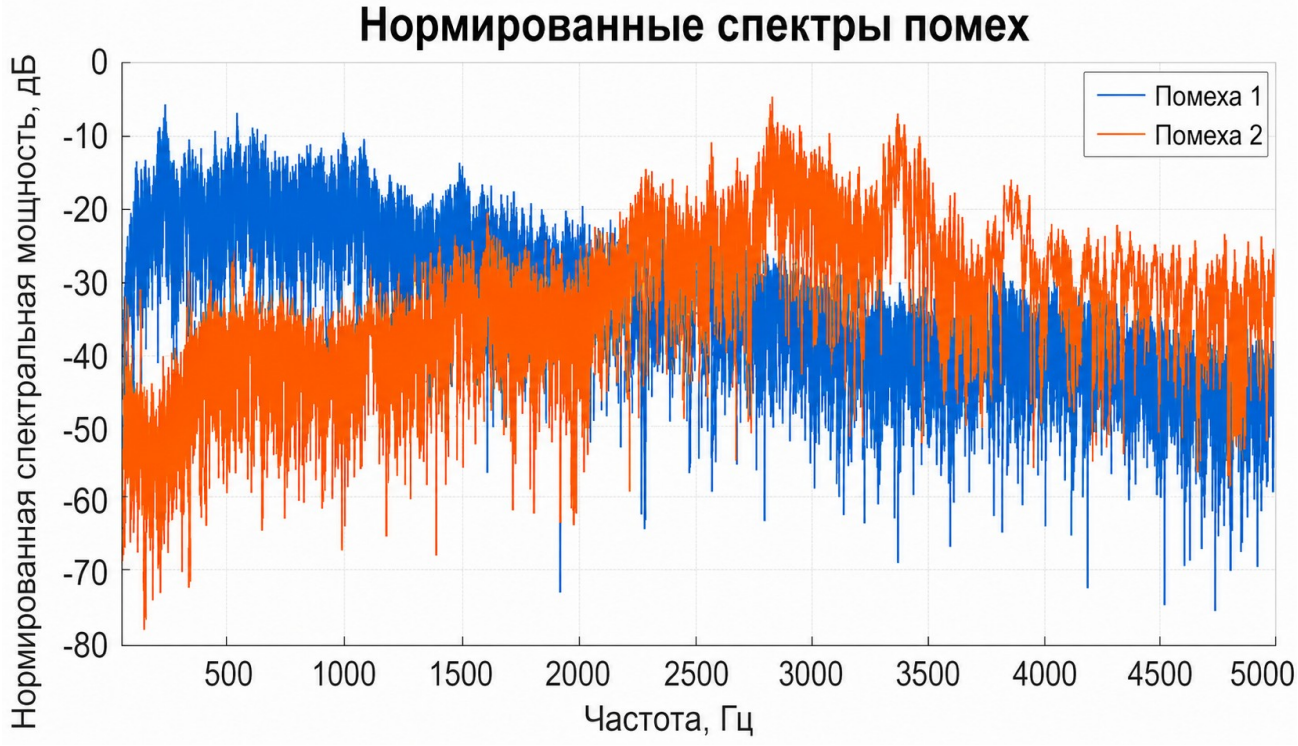


Рис. 2. Спектральные плотности мощности авиационного шума двигателя и пения птиц.

На рисунках 3 и 4 представлены пространственные (угловые) спектры сигнала антенной решетки для отношения помеха/внутренний шум помеховых источников 20 и 10 дБ, угловое разнесение между ними 20°, полученные в рамках рассматриваемых методов обработки для широкополосного случая. Поскольку анализируемый сигнал обладает конечной полосой частот, весь рабочий диапазон предварительно разбивается на совокупность частотных поддиапазонов (субполос), в пределах которых сигнал можно считать квазимонохроматическим.

На каждой частоте вычисляется отдельная реализация углового распределения мощности, отражающая вклад сигналов, приходящих с различных направлений именно на данной частоте. Таким образом, пространственный спектр строится не однократно, а последовательно для всех частотных субполос анализируемого диапазона.

На следующем этапе осуществляется объединение частотной информации с целью получения оценки направлений прихода. Для этого все рассчитанные пространственные спектры усредняются по частоте. В результате формируется итоговый пространственный спектр, аккумулирующий информацию о направлениях прихода сигналов во всем анализируемом частотном диапазоне.

Усреднение по частоте приводит к сглаживанию случайных выбросов, повышению устойчивости оценки к помехам и формированию более стабильных и отчетливо выраженных максимумов, соответствующих истинным углам прихода излучения. В результате повышается достоверность локализации источников и улучшается разрешающая способность системы в широкополосных условиях.

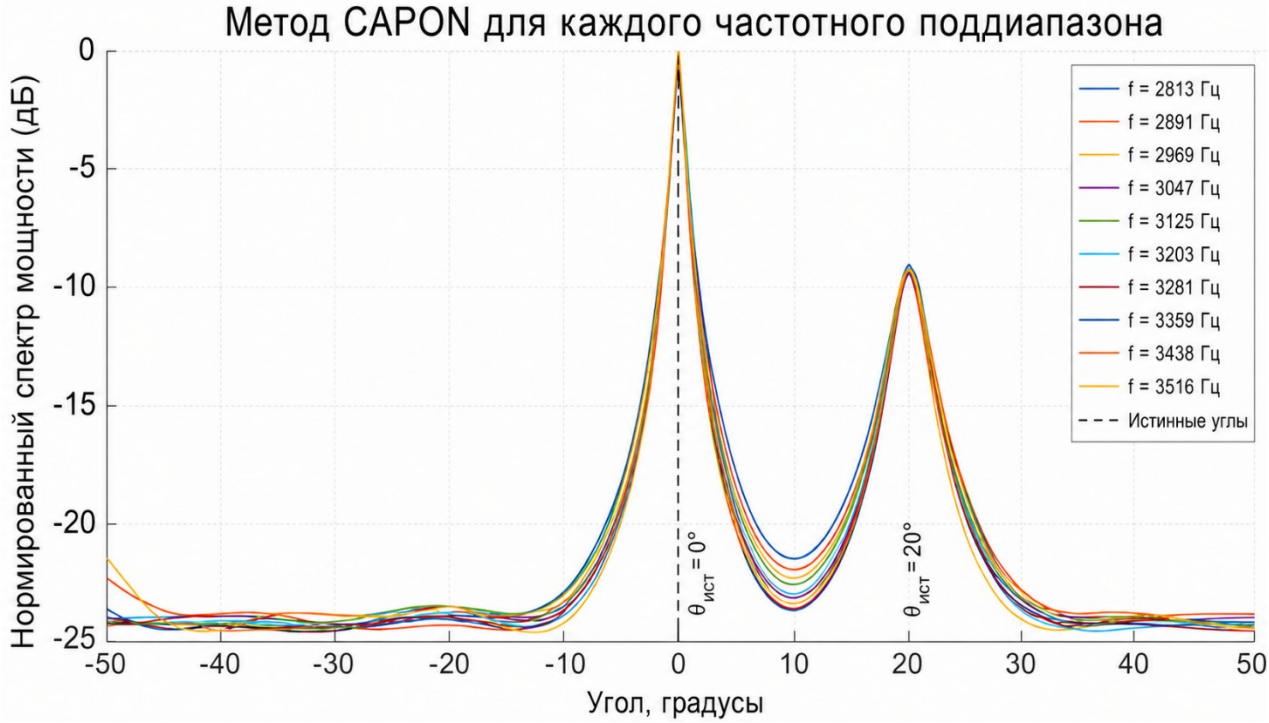


Рис. 3. Пространственные (угловые) спектры сигнала антенной решетки для каждого частотного диапазона методом Кейпона. Отношение помеха /внутренний шум помеховых источников соответственно 20 и 10 дБ, угловое разнесение между ними 20°.

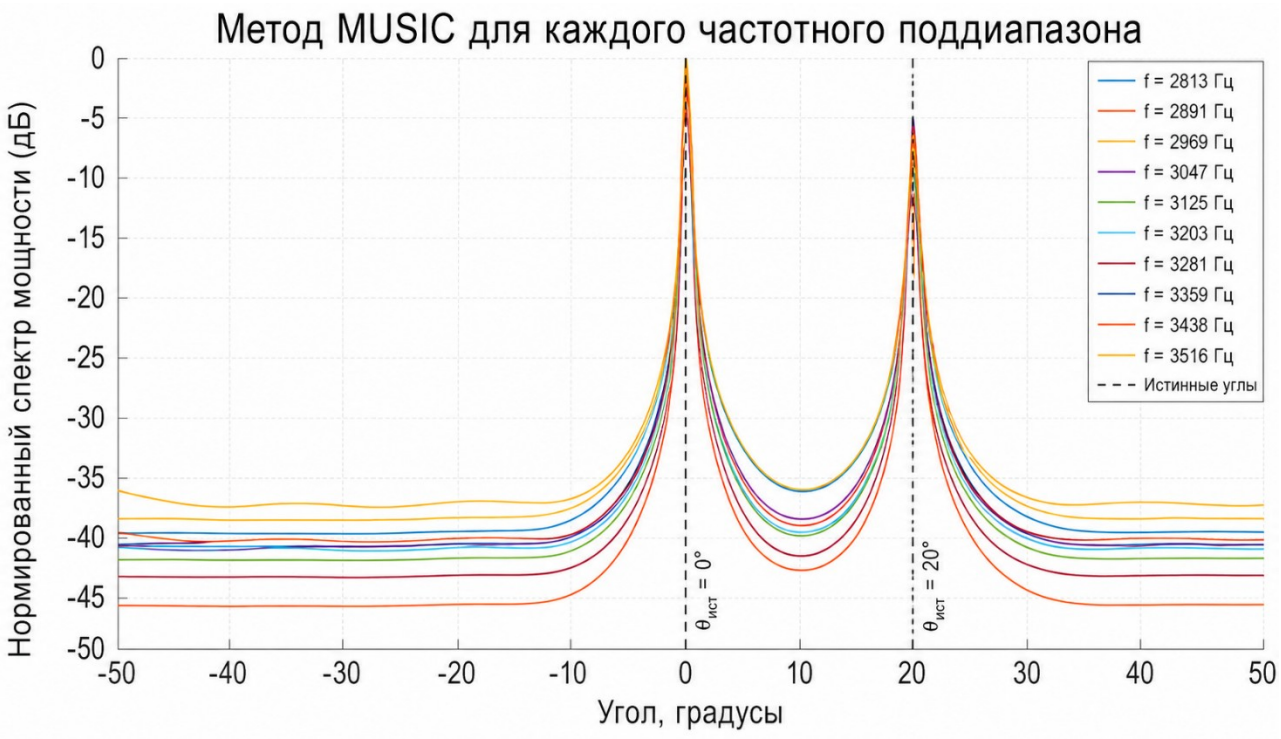


Рис. 4. Пространственные (угловые) спектры сигнала антенной решетки для каждого частотного диапазона методом MUSIC. Отношение помеха /внутренний шум помеховых источников соответственно 20 и 10 дБ, угловое разнесение между ними 20°.

На рисунке 5 показана зависимость глубины провала между пиками пространственного спектра от отношения мощности помехи к мощности внутреннего шума приемной системы для углового расстояния между источниками 20°. Под глубиной провала в данном случае понимается разность уровней максимумов, соответствующих направлениям на источники излучения, и локального минимума спектра между ними. Эта величина непосредственно характеризует степень разделимости источников в угловой области. При увеличении отношения помеха/внутренний шум улучшается статистическая устойчивость оценки корреляционной матрицы, снижается влияние собственных шумов приемных каналов и формируются более выраженные спектральные максимумы. В результате минимум между ними становится более глубоким, что свидетельствует об улучшении контрастности спектра и повышении достоверности разделения источников. При малых значениях отношения провал выражен слабо из-за зашумленности спектра и сглаживания его структуры.

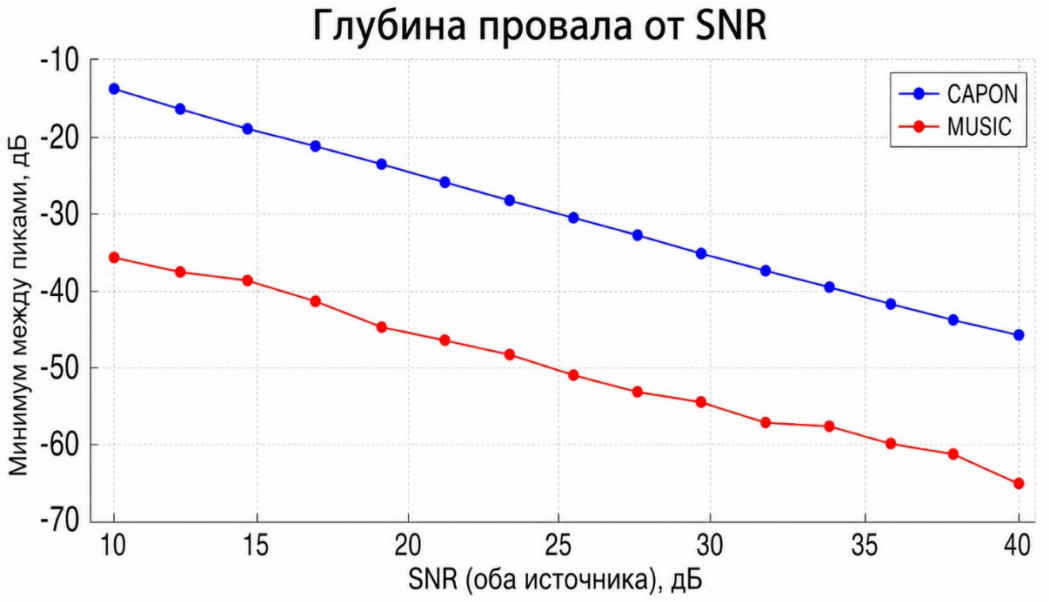


Рис. 5. Зависимость глубины провала между пиками пространственного спектра от отношения помеха/внутренний шум.

На рисунке 6 представлена зависимость глубины провала между пиками пространственного спектра от длительности входной реализации для углового расстояния между источниками 20°. Увеличение времени наблюдения приводит к росту объема статистической выборки, используемой при оценке корреляционной матрицы сигналов, что в общем случае уменьшает дисперсию оценок и повышает устойчивость пространственного спектра. Однако характер изменения глубины провала принципиально различается для методов Кейпона и MUSIC.

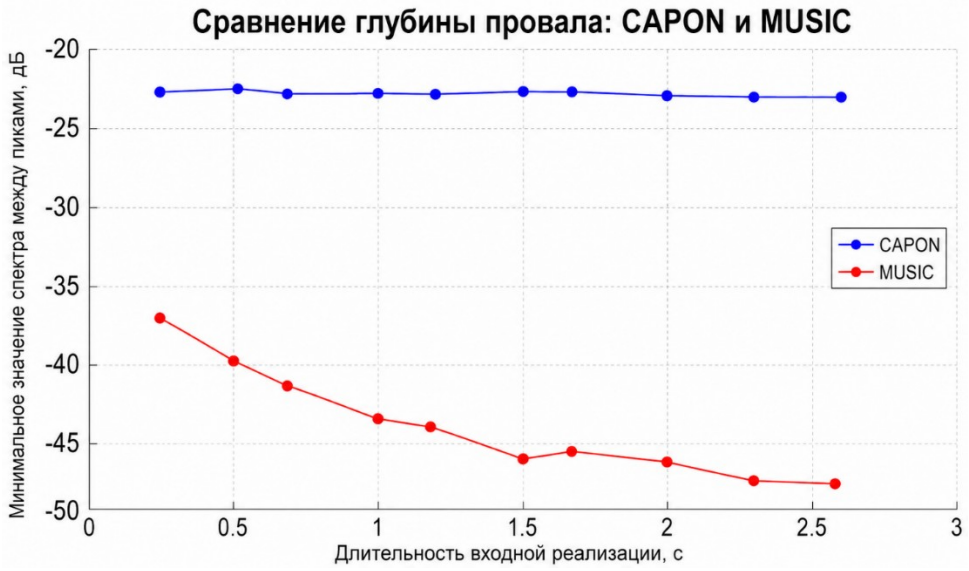


Рис. 6. Зависимость глубины провала между пиками пространственного спектра от длительности входной реализации.

Для метода Кейпона увеличение объема выборки не приводит к росту глубины провала, поскольку пространственный спектр в данном случае определяется значением обратной корреляционной матрицы сигналов. При увеличении длительности реализации происходит уточнение ее статистической оценки, что приводит главным образом к уменьшению дисперсии спектральной оценки. Однако форма пространственного спектра и уровень между пиками в основном определяются структурой самого алгоритма, поэтому увеличение числа отсчетов практически не влияет на глубину провала.

В случае MUSIC рост длительности реализации приводит к более точному разделению сигнального и шумового подпространств при разложении корреляционной матрицы. Улучшение оценки собственных значений и собственных векторов повышает ортогональность шумового подпространства относительно векторов направлений прихода сигналов, вследствие чего пики спектра становятся более выраженными, а провал между ними увеличивается.

На рисунке 7 приведена зависимость глубины провала между пиками пространственного спектра от числа элементов антенной решетки для углового расстояния между источниками 5°. Выбор столь малого углового разнесения обусловлен тем, что именно в условиях близко расположенных источников наиболее наглядно проявляется влияние числа элементов решетки на ее разрешающую способность. При большем угловом разнесении источники уже достаточно уверенно разделяются даже при сравнительно небольшом числе антенн, вследствие чего дальнейшее увеличение количества элементов приводит лишь к незначительному улучшению формы спектра и практически не влияет на глубину провала между пиками. Поэтому для демонстрации эффекта повышения разрешения целесообразно рассматривать именно малые угловые расстояния. Увеличение числа элементов расширяет апертуру системы и повышает ее пространственное разрешение, а также увеличивает число степеней свободы при формировании пространственного спектра. В результате пики становятся более узкими и высокими, а минимум между ними – более выраженным. Это приводит к росту глубины провала и улучшению угловой селективности.

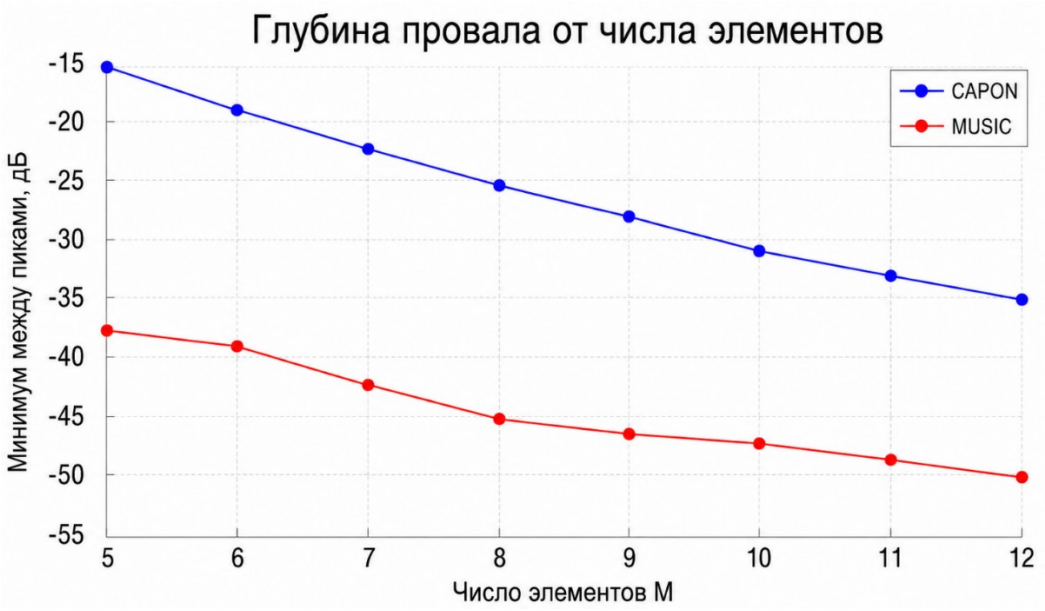


Рис. 7. Зависимость глубины провала между пиками пространственного спектра от числа элементов.

На графике приведены значения числа элементов в диапазоне от 5 до 12. Выбор именно этого интервала обусловлен практическими особенностями построения акустических содаров. В большинстве системах используется ограниченное количество приемных каналов, как правило, не превышающее 10–12 элементов. Это связано с конструктивными ограничениями антенных модулей, требованиями к габаритам и массе излучающей/приемной системы, а также с ростом стоимости и сложности аппаратной реализации при увеличении числа каналов.

На рисунке 8 показана зависимость минимального разрешаемого углового расстояния между источниками излучения для 6-ти элементной антенной решетки и длинной выборки 1 секунда. Под минимальным разрешаемым угловым расстоянием понимается такое угловое разнесение источников, при котором в пространственном спектре сохраняются два отчетливо различимых максимума, разделенных выраженным локальным минимумом. В качестве количественного критерия разделимости принимается глубина провала между пиками не менее 5 дБ. Можно отметить, что с ростом уровня помех различия в разрешающей способности рассматриваемых алгоритмов постепенно снижаются. При высоких помеховых воздействиях преимущества одного метода

перед другим становятся менее выраженными, а достигаемое угловое разрешение сближается.

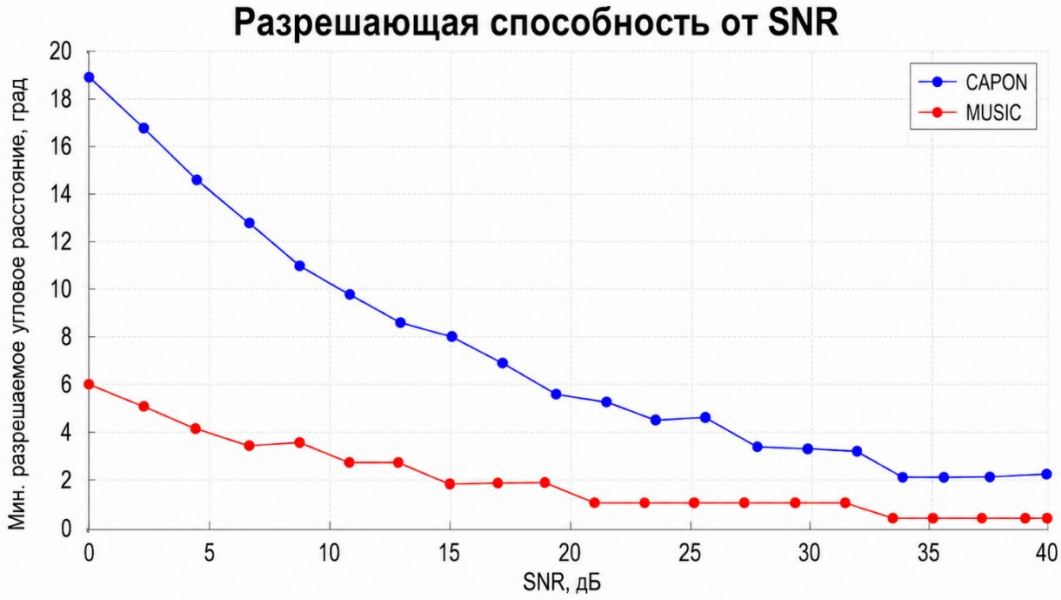


Рис. 8. Зависимость минимального разрешаемого углового расстояния от отношения помеха/внутренний шум.

Следует также отметить, что в системах акустического зондирования атмосферы помеховые составляющие, как правило, имеют уровень, значительно превышающий уровень собственных шумов аппаратуры. К таким помехам могут относиться акустические шумы окружающей среды, индустриальные источники звука и другие внешние воздействия. В связи с этим обработка сигналов в подобных системах часто осуществляется в условиях относительно высоких уровней помех. В подобных условиях различия в эффективности рассматриваемых алгоритмов пространственной локализации постепенно уменьшаются, вследствие чего оба метода могут рассматриваться как практически равноценные с точки зрения их применения при локализации помеховых составляющих.

Для наглядного сопоставления уровней помех и собственных шумов аппаратуры можно привести следующий пример. Уровень звукового давления, создаваемый взлетающим самолетом на расстоянии порядка 1 км, как правило, составляет около 70–80 дБ [22]. В то же время собственный шум аппаратуры, обусловленный характеристиками пьезоэлектрических приемопередающих элементов антенной решетки и соответствующих трактов обработки, обычно

находится на уровне порядка 20–25 дБ [23]. Таким образом, разность между уровнем внешнего акустического воздействия и внутренним шумом измерительной системы может достигать 45–50 дБ. Это наглядно демонстрирует, что в практических условиях акустического зондирования атмосферы уровень внешних помех способен многократно превышать уровень собственных шумов аппаратуры, что делает алгоритмы пространственной локализации источников более эффективными.

Переходя к вопросу практической реализуемости метода MUSIC, рассмотрим результаты оценки размерности сигнального подпространства критериями AIC и MDL, полученные для тех же условий моделирования, что и использованные выше зависимости ΔP и $\Delta\varphi_{min}$.

На рисунке 9 представлен график оценки вероятности правильного обнаружения от отношения помеха/шум при угловом расстоянии 20° при длине реализации 1 секунда, полученный по результатам $N_{\text{исп}} = 1000$ (далее для рис. 9–13 использовалось то же число испытаний) испытаний Монте-Карло для каждого значения ОПШ.

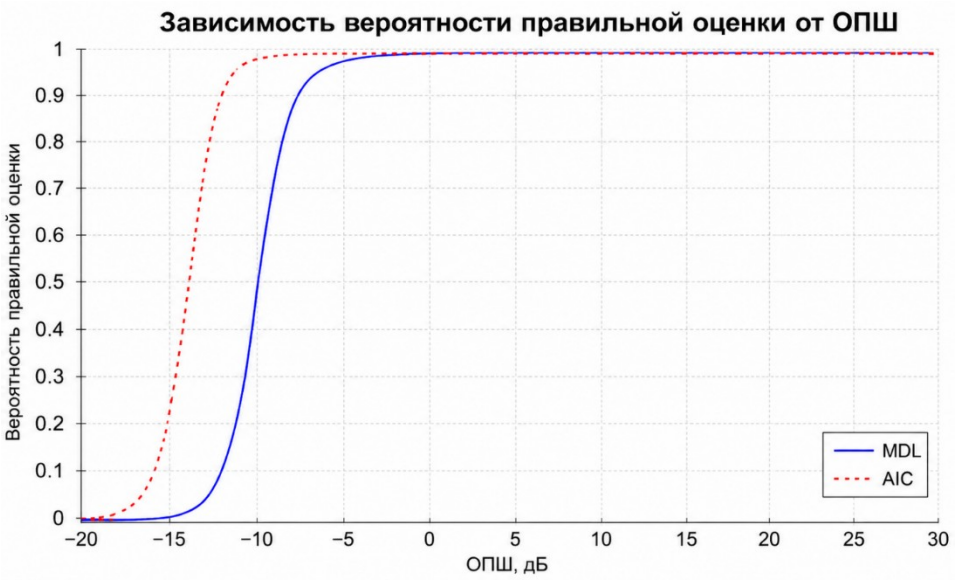


Рис. 9. Оценка вероятности правильного обнаружения от отношения помеха/шум при угловом расстоянии 20° при длине реализации 1 секунда.

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что эффективность методов информационного критерия существенно зависит от уровня помех в наблюдаемом сигнале. В частности, для метода AIC достижение

высокой вероятности корректного определения числа источников становится возможным уже при отношении помеха/шум порядка −10 дБ. В то же время метод MDL демонстрирует несколько более строгие требования к условиям наблюдения: для обеспечения сопоставимого уровня достоверности оценивания ему требуется ОПШ не хуже примерно −7,5 дБ. Это различие объясняется более консервативным характером критерия MDL, который в большей степени склонен к недооценке числа источников при неблагоприятных условиях наблюдения.

На рисунке 10 приведены аналогичные зависимости, полученные при уменьшенном угловом расстоянии между источниками до 5° при той же длине реализации сигнала (1 секунда).

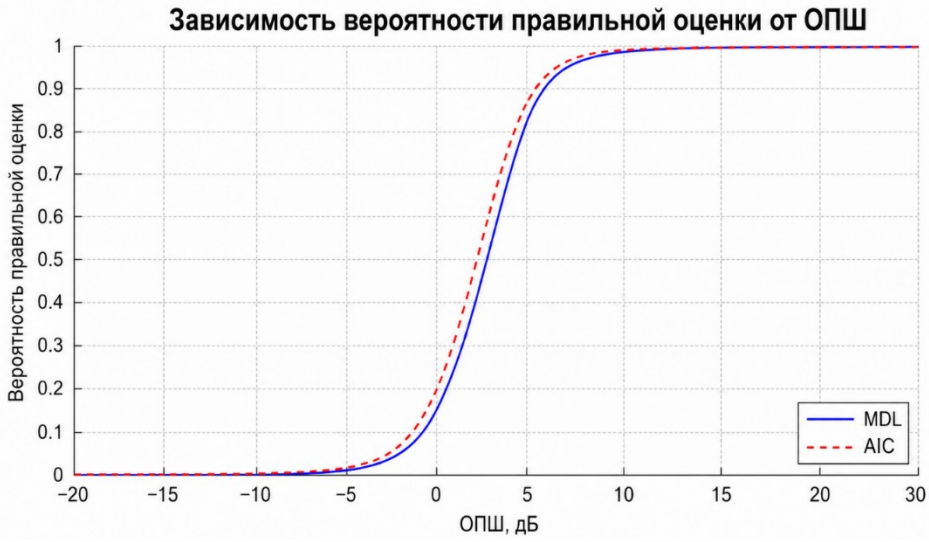


Рис. 10. Оценка вероятности правильного обнаружения от отношения помеха/шум при угловом расстоянии 5° при длине реализации 1 секунда.

Сближение источников приводит к ухудшению разрешающей способности алгоритмов и, как следствие, к существенному росту требований к отношению помеха/шум. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что в данных условиях для обоих методов – как AIC, так и MDL – необходимое ОПШ возрастает до уровня порядка 6 дБ для обеспечения высокой вероятности правильного обнаружения числа источников. Это связано с тем, что при малых угловых расстояниях собственные значения ковариационной матрицы сигналов

становятся менее различимыми, что затрудняет корректную идентификацию размерности сигнального подпространства.

Различие в результатах AIC и MDL при больших угловых расстояниях обусловлено различной строгостью штрафа за сложность модели: AIC менее консервативен и чаще выбирает большее число источников, тогда как MDL склонен к их недооценке. Однако при малых угловых расстояниях, когда собственные значения ковариационной матрицы сближаются и задача приближается к пределу разрешения, доминируют шум и конечный объем выборки. В этих условиях влияние выбора критерия снижается, и требования AIC и MDL к отношению помеха/шум становятся практически одинаковыми.

На рисунке 11 представлена зависимость вероятности правильного обнаружения числа источников от углового разнесения между ними при фиксированном ОПШ, равном 40 дБ, и длине реализации сигнала 1 секунда. Рассматриваемый уровень отношения помеха/шум соответствует условиям наблюдения, характерным для высокоинтенсивной помеховой обстановки, что является типичным для задач акустического зондирования атмосферы, где влияние внешних фоновых шумов может быть существенно.

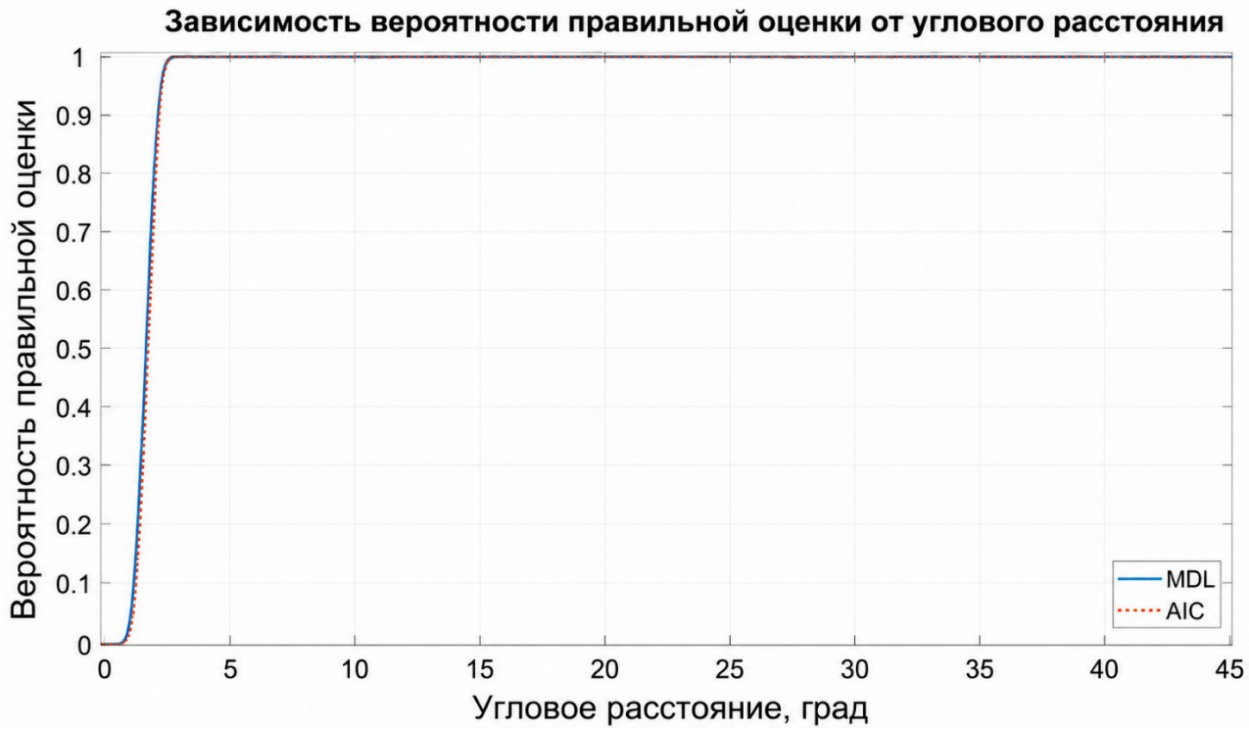


Рис. 11. Оценка вероятности правильного обнаружения от углового разнесения при ОПШ 40 дБ и длине реализации 1 секунда.

Анализ результатов моделирования показывает, что при столь высоком значении ОПШ исследуемые методы демонстрируют существенно улучшенные разрешающие характеристики. В частности, вероятность правильного оценивания числа источников остается близкой к единице даже при весьма малых угловых расстояниях между ними. Это свидетельствует о высокой устойчивости алгоритмов к взаимному перекрытию сигналов в пространственной области.

В рассматриваемом случае становится возможным надежное различение источников, находящихся на угловом расстоянии вплоть до 2,5°. Данный результат указывает на то, что при высоком уровне ОПШ собственная структура ковариационной матрицы наблюдаемого сигнала сохраняет достаточную выраженность, что позволяет корректно выделять сигнальное и шумовое подпространства даже при сильном сближении источников.

На рисунках 12 и 13 представлены графики вероятности правильного обнаружения от времени наблюдения при ОПШ 20 и 5 дБ для углового расстояния 5°.



Рис. 12. График вероятности правильного обнаружения от времени наблюдения при ОПШ 20 дБ для углового расстояния 5°.

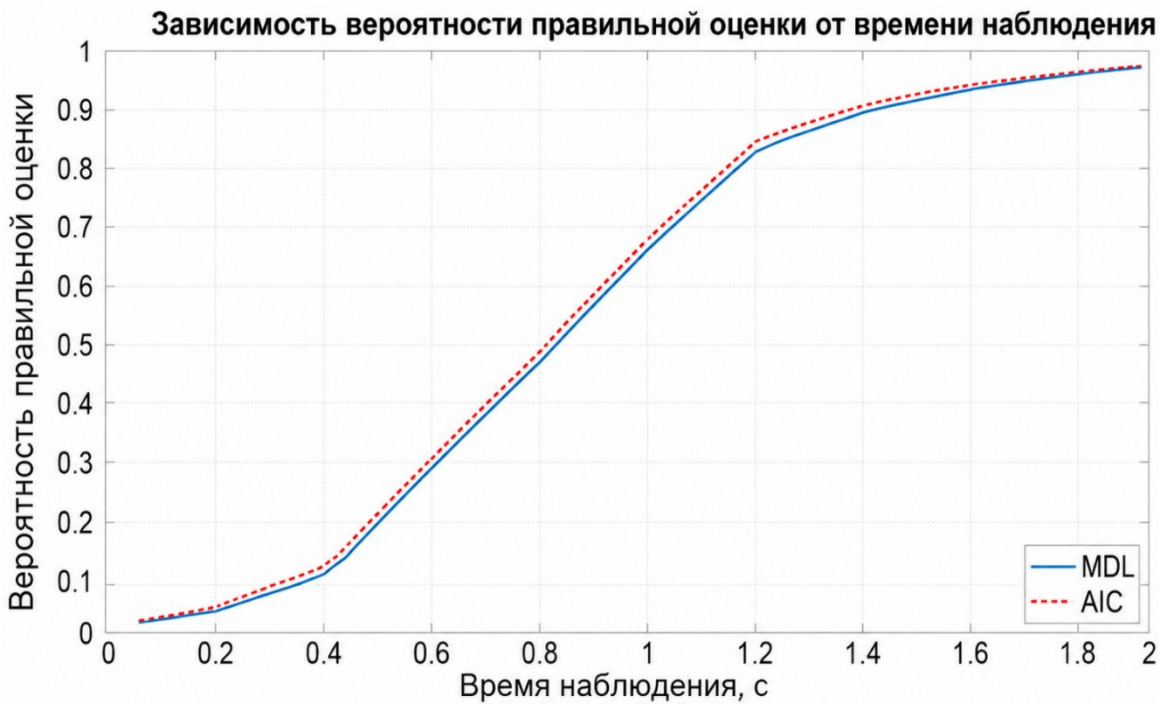


Рис. 13. График вероятности правильного обнаружения от времени наблюдения при ОПШ 5 дБ для углового расстояния 5°.

Анализ результатов моделирования показывает, что при ОПШ = 20 дБ требуемое время накопления выборки для достижения высокой вероятности правильного обнаружения является незначительным и составляет менее 0,2 секунды. Это объясняется тем, что при умеренном уровне помех собственная структура ковариационной матрицы формируется достаточно четко уже на коротких интервалах наблюдения, что обеспечивает устойчивое разделение сигнального и шумового подпространств.

В то же время при ухудшении условий наблюдения до уровня ОПШ = 5 дБ наблюдается существенное увеличение требований к длительности выборки. В данном случае для обеспечения сопоставимого уровня достоверности оценивания числа источников время накопления должно достигать значений порядка 2 секунд при частоте дискретизации 10 кГц. Увеличение длительности наблюдения в условиях низкого отношения помеха/шум позволяет компенсировать влияние шумовой составляющей за счет усреднения, что приводит к более точной оценке ковариационной матрицы и, как следствие, повышению вероятности корректного определения размерности сигнального подпространства.

Заключение

Во второй части работы проведено детальное исследование разрешающей способности двух широко применяемых методов сверхразрешающей пеленгации – Кейпона и MUSIC – применительно к задаче локализации широкополосных акустических помех в атмосферных системах мониторинга. В отличие от первой части, где основное внимание уделялось концепции адаптивного выбора направления зондирования и общему описанию алгоритмов, здесь основой акцент сделан на количественном анализе факторов, определяющих практическую эффективность этих методов.

По результатам имитационного моделирования, выполненного с использованием реальных записей акустических помех (шум авиационного двигателя и пение птиц) и учитывающего широкополосный характер сигналов, можно сформулировать следующие основные выводы.

Увеличение ОПШ закономерно повышает контрастность пространственного спектра (глубину провала между пиками) для обоих алгоритмов. Метод MUSIC демонстрирует более высокую чувствительность к росту ОПШ, обеспечивая лучшее разделение источников в широком диапазоне уровней. При высоких отношениях помеха/шум (более 30–40 дБ), характерных для реальных условий акустического мониторинга (где уровень внешних помех может на десятки децибел превышать собственные шумы аппаратуры), различия в эффективности методов сглаживаются, и оба подхода становятся практически равноценными.

Увеличение времени наблюдения (объема выборки) по-разному сказывается на рассматриваемых алгоритмах. Для метода MUSIC рост длительности реализации приводит к более точному разделению сигнального и шумового подпространств, что выражается в увеличении глубины провала и повышении устойчивости оценок. Метод Кейпона, напротив, достигает насыщения уже при относительно небольших выборках, и дальнейшее увеличение времени накопления не дает существенного выигрыша в разрешающей способности.

Увеличение количества приемных элементов (апертуры решетки) ожидаемо улучшает угловое разрешение обоих методов. При малом числе каналов (5–12 элементов), характерном для содаров, метод MUSIC обеспечивает более высокую разрешающую способность по сравнению с методом Кейпона, особенно в условиях малого углового разнесения источников.

Для типичной 6-элементной решетки при высоких отношениях помеха/шум (свыше 30 дБ) оба метода позволяют надежно разрешать источники, разнесенные на 5° (при критерии разделимости 5 дБ). Это подтверждает принципиальную возможность использования данных алгоритмов в системах акустического зондирования атмосферы.

Отдельное исследование надежности информационных критериев AIC и MDL для оценки размерности сигнального подпространства показало, что при угловом расстоянии между источниками 20° высокая вероятность правильного определения их числа достигается уже при ОПШ порядка −10 дБ (AIC) и −7,5 дБ (MDL). При сближении источников до 5° требуемое ОПШ возрастает до ~6 дБ для обоих критериев. При высоком ОПШ (40 дБ) надежное определение числа источников возможно при угловом разнесении вплоть до 2,5°, а требуемое время накопления сокращается с ~2 с (при ОПШ = 5 дБ) до менее 0,2 с (при ОПШ = 20 дБ). Эти результаты задают практические границы применимости метода MUSIC с точки зрения предварительной оценки числа источников и дополняют выводы о его угловом разрешении.

Таким образом, проведенное исследование восполняет пробел, связанный с отсутствием количественных оценок разрешающей способности методов сверхразрешения в условиях атмосферной акустики. Полученные зависимости позволяют обоснованно выбирать параметры системы (количество элементов, время накопления) и конкретный алгоритм пеленгации в зависимости от ожидаемой помеховой обстановки. В совокупности с результатами первой части работы, предлагаемый подход к адаптивному выбору направления зондирования на основе предварительной оценки угловых координат помех получает

законченное обоснование, что открывает путь к его практической реализации в перспективных акустических системах мониторинга атмосферы.

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 Taylor & Francis Group, 2007. – 296 p.
3. 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
4. Rodionov A.A., Savelev N.V. Acoustic Imaging with Superresolution Techniques Using Nonequidistant Planar Antenna Arrays // Acoustical Physics. – 2025. – Т. 71. – №. 1. – С. 42-49. https://doi.org/10.31857/S0320791925010075
5. Иваненков А.С., Родионов А.А., Савельев Н.В. Построение акустических изображений с помощью гибких микрофонных антенных решеток с использованием сверхразрешающих методов // Изв. вузов. Радиофизика. – 2021. – Т. 64. – №. 7. – С. 522-534. https://doi.org/10.52452/00213462_2021_64_07_522
6. Родионов А.А., Семенов В.Ю. Шумопеленгация акустических источников с помощью решеток микрофонов при наличии интенсивной помехи // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2023. – Т. 66. № 4. – С. 253-261. https://doi.org/10.52452/00213462_2023_66_04_253

7. Малышкин Г.С., Шафранюк А.В. Адаптивное разрешение широкополосных гидроакустических сигналов с частично нарушенной когерентной структурой // Акустический журнал. – 2013. – Т. 59. № 5. – С. 613. https://doi.org/:10.7868/S0320791913040102
8. 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. https://doi.org/10.7868/S0320791913040114
9. Capon J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis // Proceedings of the IEEE. – 1969. – Vol. 57. – P. 1408-1418.
10. Мюнье Ж., Делиль Ж.Ю. Пространственный анализ в пассивных локационных системах с помощью адаптивных методов // ТИИЭР. – 1987. – Т. 75. № 11. – С. 21-37.
11. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М.: Радио и связь, 2003. – ISBN 5-256-01698-9.
12. Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation / editors T. Engin Tuncer, Benjamin Friedlander. – Academic Press, 2009. – ISBN 978-0-12-374524-8.
13. Гейбриелл У.Ф. Спектральный анализ и методы сверхразрешения с использованием адаптивных решеток // ТИИЭР. – 1980. – Т. 68. № 6. – С. 19-32.
14. Crescenti G.H. The degradation of doppler sodar performance due to noise – acoustic sounder measurements // Atmospheric Environment. – 1998. – Vol. 32, N 9. – P. 1499-1509.
15. Литвинов О.С., Применко Д.А., Винтайкин Б.Е., Борута В.С. Сравнение эффективности применения корреляционных методов пеленгации и разрешения источников сигналов // Антенны. – 2020. – № 5(267). – С. 32-41. https://doi.org/10.18127/j03209601-202005-04

16. 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. – 2008. – Vol. 44, N 4. – P. 1585-1599. https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4667733
17. Fang Q.Y., Han Y., Jin M.Z., Liu W.D. Modification of Evaluation Criterion for DOA Estimation Algorithms in Resolving Incident Signals with Different Power // Journal of Signal Processing. – 2021. – Vol. 37, N 7. – P. 1285-1294. https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2021.07.019
18. 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. – № 1-1. – С. 27-29.
19. Wax M., Kailath T. Detection of signals by information theoretic criteria // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1985. – Vol. 33, N 2. – P. 387-392. https://doi.org/10.1109/TASSP.1985.1164557
20. Akaike H. A new look at the statistical model identification // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1974. – Vol. 19, N 6. – P. 716-723. https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705
21. Rubinstein R.Y., Kroese D.P. Simulation and the Monte Carlo method. – John Wiley & Sons, 2016.
22. Smith M.J.T. Aircraft Noise. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. – 418 p.
23. Kinsler L.E., Frey A.R., Coppens A.B., Sanders J.V. Fundamentals of Acoustics. – New York: John Wiley & Sons, 2000. – 560 p.

Для цитирования:

Красненко Н.П., Рыбаков И.А. Адаптивный выбор направления зондирования в акустических системах на основе сверхразрешающей пеленгации источников помех. Часть 2 // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 9. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.5