

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**«Обнаружение источников звука с помощью
антенных решёток различной конфигурации»**

Аспирант: Савельев Николай Викторович

(подпись аспиранта)

Научный руководитель:

Родионов Александр Алексеевич,
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией.

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

01.04.03 Радиофизика

Форма обучения: очная

Актуальность темы исследования. На протяжении многих десятилетий антенные решетки (АР) находят применения в различных областях науки и техники. Обладая возможностями пространственной фильтрации, АР имеют существенное преимущество перед одиночными приёмными системами в отношении обнаружения и локализации источников сигнала, разделения этих сигналов в пространстве. По этой причине исследование возможностей АР представляет большой интерес, что обусловило появление развитой теории обработки сигналов в АР [1–4]. Стоит отметить, что АР имеют большое количество практических приложений в таких областях, как радио- и гидролокация, дистанционное зондирование, беспроводные системы связи, системы глобального позиционирования, радиоастрономия, сейсмология, акустика, биомедицина и т.д. Нередко для каждой конкретной задачи требуется своя индивидуальная конфигурация приемных элементов АР. Иногда для достижения поставленных целей достаточно использовать линейную эквидистантную АР, для других задач такой системы недостаточно и необходимо использовать сложную планарную АР.

Самой простой конфигурацией АР можно считать линейную эквидистантную АР. Такие АР активно применяются в гидролокации и в большинстве случаев располагаются вертикально или горизонтально (в данной работе мы ограничимся рассмотрением вертикально расположенных антенн) и служат для обнаружения возмущений в подводной среде, которые могут иметь как природное, так и техногенное происхождение. Одним из природных источников таких возмущений являются внутренние волны, механизмы возникновения и обрушения которых активно исследуются в последнее время различными методами, в том числе и акустическими [5, 6]. К возмущениям техногенного типа можно отнести, к примеру, выбросы посторонних веществ вследствие нарушения целостности подводного трубопровода [7]. Также возмущение среды может создавать и движущаяся в водной среде высококонтрастная неоднородность. Для обнаружения таких неоднородностей традиционно применяют импульсную локацию, использующую эхосигналы, рассеяние которых на неоднородностях направлено преимущественно «назад». В последнее время, однако, в качестве альтернативного варианта активно применяют метод, использующий рассеяние в направлении «вперед» (просветная локация) [8, 9]. При таком способе сечение рассеяния существенно возрастает. Этот метод основан на регистрации приемной системой сигнала прямого рассеяния звука при пересечении движущейся неоднородностью трассы распространения звукового сигнала. В то же время понятно, что неоднородность, при прохождении ей трассы распространения локационного сигнала, может оставлять некоторые возмущения в среде распространения (например, изменять профиль скорости звука вследствие смешивания слоёв тёплой и холодной воды, генерировать внутренние волны, возмущать поверхность среды распространения и др.). Звуковой сигнал, создаваемый излучающей системой и проходящий через данное возмущение, может изменить свои характеристики по сравнению со случаем невозмущенной среды. В связи с этим, развитием

идеи просветной локации может быть попытка обнаружить такой «след» за счет фиксации определенных изменений в принимаемом сигнале. В настоящей работе с помощью численного моделирования будут исследованы возможности обнаружения возмущений среды на основе указанного принципа.

Как ранее было сказано, для некоторых задач использование линейной АР может быть недостаточно. В частности, это связано с весьма ограниченными возможностями линейной АР по локализации источников в трехмерном пространстве. В связи с этим всё более популярными становятся АР, конфигурацию которых пользователь может менять [10]. Такие АР, дополнительно оборудованные системой фото- или видеофиксации и получившие название акустические камеры [11], имеют широкое применение в построении акустических изображений – функций распределения в пространстве некоторых величин (например, энергии волнового поля). В данных устройствах получаемый акустический портрет накладывается на фото- или видеоизображение для локализации областей акустического излучения. С помощью акустических камер решается ряд задач, направленных на обнаружение и локализацию источников повышенного излучения механизмов, определение утечек звука в помещениях и салонах транспортных средств, локализацию источников звука на движущихся транспортных средствах [12–14]. Основными методами построения изображений в акустических камерах являются неадаптивные алгоритмы (например, суммирование с задержками), не учитывающие в используемой модели возможное наличие нескольких локальных источников. Следствием этого является низкая разрешающая способность и невозможность локализации слабых источников на фоне интенсивных. Для преодоления указанных недостатков ранее был предложен ряд адаптивных методов. В настоящий момент методом с наибольшей разрешающей способностью для АР с произвольной пространственной конфигурацией является метод MUSIC [15]. Для успешной его реализации, однако, необходимо знать общее число источников. Определение этого числа представляет собой отдельную сложную задачу. Использование метода MUSIC также не позволяет определить интенсивность источников излучения. Другим широко используемым адаптивным методом для построения изображений является метод Кейпона [16]. Акустический портрет, построенный с его помощью, представляет собой пространственное распределение интенсивностей источников. В случае, когда точно известны корреляционная матрица принимаемого сигнала и вектор направлений на источник полезного сигнала, данный метод позволяет оценить мощность полезного сигнала на выходе АР. В практических приложениях корреляционная матрица принимаемого сигнала заменяется на её оценку – выборочную корреляционную матрицу; вектор направлений на полезный источник также известен неточно. Такое несоответствие всегда возникает на практике из-за разброса фазово-частотных характеристик приёмников, ошибок в задании координат, наличия реверберации и др. Упомянутое рассогласование проявляется в существенном уменьшении оцениваемой мощности

сигналов источников по сравнению с реальной, а также ведет к уменьшению разрешающей способности. Тем не менее, применение метода Кейпона не требует знания числа источников помех, поэтому в некоторых приложениях может быть предпочтительнее метода MUSIC для локализации источников. При этом известно, что метод Кейпона обладает существенно меньшей разрешающей способностью, чем метод MUSIC. В настоящей работе для построения акустических изображений будет исследована возможность использования предложенного ранее метода максимально правдоподобной классификации сигналов (МПКС)¹ [17]. В указанной работе предлагается считать, что часть корреляционной матрицы помехи, отвечающей за распределенные в пространстве источники, состоит из ограниченного числа матриц единичного ранга (диад). Векторы, из которых составлены данные диады, без ограничения общности можно считать ортогональными. Ранее было показано, что данный подход позволяет эффективно оценивать неизвестные параметры полезного источника, например, пеленг, интенсивность, временную форму. Аргументом к использованию МПКС в задаче построения акустических изображений является тот факт, что его разрешающая способность превосходит разрешающую способность метода MUSIC.

Важной задачей, связанной с построением акустических изображений, является задача оценки координат микрофонов АР после задания определенной конфигурации АР с изменяемой конфигурацией (например, выполненной на гибком кабеле). В качестве существующих методов определения положения микрофонов можно указать прямое (механическое) измерение координат, оптические методы и методы с использованием опорных акустических источников. Последние, в отличие от остальных, не требуют привлечения дополнительного дорогостоящего оборудования и могут проводиться для широкого набора пространственных конфигураций микрофонов. В данной работе мы будем использовать метод, основанный на использовании набора калибровочных источников сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Идея метода предложена ранее в нескольких работах (см., например, [18]). Суть метода заключается в оценке относительных временных задержек прихода ЛЧМ импульсов на микрофоны решетки от излучателя, положение которого меняется в пространстве. Неизвестные координаты элементов находятся из решения системы нелинейных уравнений, в которую входят полученные временные задержки, неизвестные координаты приёмников и излучателей. Основная сложность реализации этого метода заключается в поиске решения указанной системы уравнений. При определенном числе источников система уравнений становится переопределенной, что позволяет увеличить точность оценки координат и устойчивость решения по отношению к ошибкам в определении временных задержек. Для решения системы уравнений используется известный прием, при котором эта задача сводится к поиску глобального минимума целевой

¹ Данный подход имеет более строгую теоретическую основу, чем упомянутые ранее адаптивные методы.

функции². В работе [18] предложен один из вариантов реализации такого подхода. Недостатком предложенного варианта метода является сильная зависимость качества сходимости от начального приближения. Имеется весьма большая вероятность попадания в локальный минимум. В настоящей работе для преодоления указанной проблемы предлагается использовать итерационный алгоритм поиска глобального минимума, заключающийся в постепенном увеличении размерности пространства неизвестных параметров.

Выше для обнаружения возмущения среды предлагалось использовать вертикальную эквидистантную АР. Такие АР наиболее часто используются также в задачах локации. Характеристики таких АР определяются отношением D/λ , где D – длина АР, λ – длина волны. Таким образом, например, для линейной АР $D/\lambda = N/2$. То есть характеристики определяются количеством элементов АР. В задачах гидролокации полезные сигналы часто бывают широкополосными, поэтому возникает необходимость, сохраняя неизменным число элементов и размер АР, расширить рабочий частотный диапазон АР (уменьшить минимальную λ) с увеличением или сохранением точности пеленгации. Это может быть достигнуто только в неэквидистантных АР, для которых среднее межэлементное расстояние больше $\lambda/2$. Такие АР принято называть разреженными [19, 20], а показатель разреженности U определяется отношением $U = (D/\lambda)/(N/2)$, $U > 1$. Синтезу неэквидистантных решёток, т. е. выбору расположения их приёмных элементов, обеспечивающем заданный или приемлемый уровень боковых лепестков (УБЛ), посвящена обширная литература, например работы [40–42], которые содержат ряд примеров синтеза неэквидистантных антенных решёток с параметром U порядка нескольких единиц и низким УБЛ. При увеличении значения U возрастает УБЛ диаграммы направленности АР, что напрямую влияет на эффективность пеленгации источников (в частности, возрастает вероятность аномальных ошибок). Таким образом, возникает вопрос: до какого значения можно увеличивать показатель разреженности АР для эффективного решения типовых задач (например, обнаружения и локализации источников плоских волн). В статье [21] исследованы возможности линейных разреженных АР в задачах обнаружения и пеленгации источников сигнала. В этой работе для количественного описания возможностей разреженной антенной решётки предложена новая характеристика – вероятность обнаружения и оценки, изложена методика её расчёта. Также в статье рассмотрена задача нахождения максимальной длины разреженной антенной решётки с фиксированным числом элементов N , для которой сохраняются приемлемые характеристики обнаружения источников сигналов. Показано, что при незначительном увеличении отношения сигнал/шум вероятность обнаружения и оценки остаётся такой же, что и для стандартной N -элементной антенной решётки с межэлементным расстоянием в половину длины волны, а точность пеленгации растёт пропорционально размеру решётки.

² Являющейся, например, суммой квадратов разностей левых и правых частей уравнений.

Наша работа будет посвящена изучению свойств планарных (двумерных) разреженных АР, а именно будут исследованы вероятностные характеристики планарных разреженных АР в зависимости от значений их параметров.

Степень разработанности. Первые две главы являются законченными исследовательскими работами. Третья глава нуждается в доработке, а именно будет рассмотрена задача нахождения максимальной апертуры планарной разреженной антенной решётки с фиксированным числом элементов, для которой сохраняются приемлемые характеристики обнаружения источников сигналов. Также будет рассмотрено влияние уровней боковых лепестков на характеристики обнаружения и локализации.

Цели и задачи. В соответствии с изложенным выше кругом проблем, основными целями и задачами работы являются:

- разработка метода обнаружения гидрофизического возмущения, не зависящего от его конкретного вида (модели), с помощью приема вертикальной антенной решеткой прошедшего через это возмущение акустического сигнала; исследование характеристик обнаружения этого возмущения в зависимости от различных параметров задачи, таких как размеры и величина возмущения, отношение сигнал/шум и т.п.;
- построение способа оценки координат микрофонов, основанный на использовании набора калибровочных источников сигнала с линейной частотной модуляцией, и исследование возможности его использования в задачах сверхразрешения;
- исследование возможностей неэквидистантных разреженных планарных антенных решеток для решения задач обнаружения и оценки параметров источников.

Научная новизна:

- предложен алгоритм обнаружения возмущения профиля скорости звука, основанный на обобщенном критерии отношения правдоподобия и не зависящий от его конкретного вида (модели); с помощью численного моделирования показана возможность обнаружения возмущений разных типов, для каждого из которых установлено своё предельное значение ОСШ;
- для частного случая известных и равных интенсивностей фонового шума дана интуитивная интерпретация работы предложенного критерия. Найдены параметры, от которых целиком зависят характеристики обнаружения;
- разработан метод, использующий калибровочные источники акустических ЛЧМ импульсов с последующим подбором координат микрофонов и источников для оптимизации целевой функции, являющейся нормой разницы векторов измеренных и модельных задержек распространения импульсов (между источниками и микрофонами). Предложенный метод оптимизации основан на пошаговом увеличении числа неизвестных

(координат микрофонов и калибровочных источников) с использованием на каждом последующем шаге результатов, полученных на предыдущем шаге, в качестве начального приближения;

- исследована диаграмма направленности таких решеток, в частности особое внимание было уделено уровням боковых лепестков (УБЛ). Была построена зависимость вероятности аномальной ошибки от значения отношения сигнал/шум для различных значений максимального УБЛ.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты работы предназначены для решения актуальных практических задач. В первых двух главах приведены результаты успешного практического использования предложенных подходов. В третьей главе получен важный теоретический результат, показывающий при каких максимальных УБЛ вероятности появления аномальных ошибок при пеленгации разреженными планарными антенными решетками практически не меняется. Предложенный в первой главе метод также имеет теоретическое значение, поскольку основан на новом подходе к решению задачи обнаружения возмущения.

Методология и методы исследования. Методология исследования основана на использовании аппарата математической статистики и статистической радиофизики, включающего методы современной теории оценки параметров сигналов.

Положения, выносимые на защиту:

- Предложен алгоритм обнаружения возмущения профиля скорости звука, основанный на наиболее общей модели принимаемого сигнала и использующий обобщенный критерий отношения правдоподобия;
- С помощью численного моделирования показана возможность обнаружения возмущений разных типов, для каждого из которых установлено своё предельное значение ОСШ. На данных озерного эксперимента показана возможность обнаружения возмущений с помощью предложенного алгоритма;
- Предложен способ оценки координат микрофонов, основанный на пошаговом увеличении числа неизвестных (координат микрофонов и калибровочных источников). Показано, что достигнутая точность оценки координат позволяет осуществлять разрешение близких источников (сверхразрешение);
- Для планарных случайно-неравномерных антенн получено выражение для средней диаграммы направленности и показано для какого интервала значений максимального УБЛ пороговое значение вероятности аномальной ошибки почти не зависит от максимального значения УБЛ.

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности, полученных в диссертации, обеспечивается применением к решению поставленных задач аппарата математической статистики, статистической радиофизики, включающий современные методы современной теории оценки параметров сигналов. Основные результаты данной работы представлены в 6 публикациях (2 статьи и 4 доклада на конференциях) и были представлены на следующих конференциях: XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2016), II Всероссийской акустической конференции (Нижний Новгород, 6-9 июня 2017), XXIV Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки, Нижний Новгород, 21-24 мая 2019 года), XXXII Сессия РАО (Москва 14-18 октября 2019).

Основное содержание работы.

Во **введении** раскрывается актуальность и практическая значимость рассматриваемых в работе задач и современное состояние проблем, затронутых в работе. Приводятся цели и задачи работы и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** работы предложен алгоритм обнаружения возмущения профиля скорости звука, основанный на обобщенном критерии отношения правдоподобия с помощью вертикальной антенной решетки. Данный алгоритм не зависит от модели возмущения, что дает возможность его применения в условиях неизвестных характеристик возмущения. С помощью численного моделирования показана возможность обнаружения возмущений разных типов, для каждого из которых установлено своё предельное значение ОСШ. Рассмотрены вопросы влияния на предельное ОСШ информации о виде возмущенного и невозмущенного поля на приемной антенне, а также количества используемых частотных полос. Для частного случая известных и равных интенсивностей фонового шума дана интуитивная интерпретация работы предложенного критерия. Найдены параметры, от которых целиком зависят характеристики обнаружения. Это позволяет проводить оценку этих характеристик для любого возмущения без выполнения вычислительно затратного численного моделирования.

В §1.1 формируется постановка задачи. Рассматривается детерминированный волновод с постоянной глубиной и заданным профилем скорости звука. Сигнал, созданный излучающей антенной, проходит через среду и регистрируется приемной антенной. Предполагается, что между антеннами может присутствовать некое возмущение параметров среды. В данной части работы под таким возмущением понимается локальная неоднородность в профиле скорости звука. Целью является разработка оптимального метода определения наличия или же отсутствия этого возмущения. Будем считать, что на излучающую антенну подается сигнал в виде гауссова пучка с постоянными параметрами. Приёмная антенная решётка регистрирует сигнал, прошедший через среду, в виде суммы комплексной амплитуды сигнала источника и белого гауссова шума. При этом будем полагать, что мы имеем два набора данных,

представляющих собой гетеродинированные узкополосные сигналы. Предполагается, что в первом наборе данных возмущение в волноводе отсутствует. Второй набор данных может соответствовать как невозмущённому, так и возмущённому волноводу. Таким образом, используя наборы принятых сигналов нужно определить, возмущённую или невозмущённую структуру имеет волновод во втором случае.

В §1.2 приводится метод обнаружения возмущения в среде. Решаемая задача является классической задачей математической статистики о проверке гипотез. В данном случае имеются две гипотезы. В первой гипотезе предполагается, что структура волновода является невозмущённой. Во второй гипотезе предполагается, что структура волновода изменилась. Для выбора правильной гипотезы используется обобщенный критерий отношения правдоподобия, который, как известно из математической статистики, является оптимальным методом выбора такого рода гипотез. В рассматриваемом случае для гипотезы H_0 логарифм функции правдоподобия будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \ln W_0(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_m) = & -(K_0 + K_1)N \ln \pi - N(K_0 \ln \sigma_0^2 + K_1 \ln \sigma_1^2) - \\ & - \sigma_0^{-2} \sum_{k=1}^{K_0} (\mathbf{x}_k - \mathbf{a}_0)^H (\mathbf{x}_k - \mathbf{a}_0) - \sigma_1^{-2} \sum_{m=1}^{K_1} (\mathbf{y}_m - \mathbf{a}_0)^H (\mathbf{y}_m - \mathbf{a}_0), \end{aligned} \quad (1)$$

для гипотезы H_1 :

$$\begin{aligned} \ln W_1(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_m) = & -(K_0 + K_1)N \ln \pi - N(K_0 \ln \sigma_0^2 + K_1 \ln \sigma_1^2) - \\ & - \sigma_0^{-2} \sum_{k=1}^{K_0} (\mathbf{x}_k - \mathbf{a}_0)^H (\mathbf{x}_k - \mathbf{a}_0) - \sigma_1^{-2} \sum_{m=1}^{K_1} (\mathbf{y}_m - \mathbf{a}_1)^H (\mathbf{y}_m - \mathbf{a}_1), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_m$ – принятые векторы сигналов размерности $N \times 1$, k и m – номера временных отсчетов, K_0, K_1 – количество временных отсчетов для первого и второго набора данных соответственно, $\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1$ – комплексные амплитуды сигнала источника размерности $N \times 1$ на приемной антенне, определяемые функцией Грина волновода и амплитудно-фазовым распределением сигнала на излучающей антенне, ξ_k, ζ_m – векторы, каждый из которых представляет собой белый гауссов шум с нулевым средним и корреляционными матрицами: $E\{\xi_k \xi_k^H\} = \sigma_0^2 \mathbf{I}$, $E\{\zeta_m \zeta_m^H\} = \sigma_1^2 \mathbf{I}$, σ_0^2, σ_1^2 – интенсивности аддитивного шума для первого и второго наборов данных соответственно. В формулы (1) и (2) входят неизвестные параметры $\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \sigma_0^2, \sigma_1^2$. Для нахождения оценок этих величин применяется метод максимального правдоподобия (ищется максимум функций).

В §1.3 приводятся результаты численного моделирования для двух модельных возмущений. На излучающую антенну подавался сигнал с фиксированной частотой. Далее было рассчитано поле на принимающей антенне после его прохождения через среду распространения. Расчет производился с помощью метода, основанного на решении

широкоугольного параболического уравнения. Принятое поле рассчитывалось для двух случаев: для отсутствующего возмущения в профиле скорости звука и для случая, когда возмущение скорости звука присутствует. Далее рассчитывались вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения в зависимости от значения порога. Данные зависимости представлены на рис. 1.

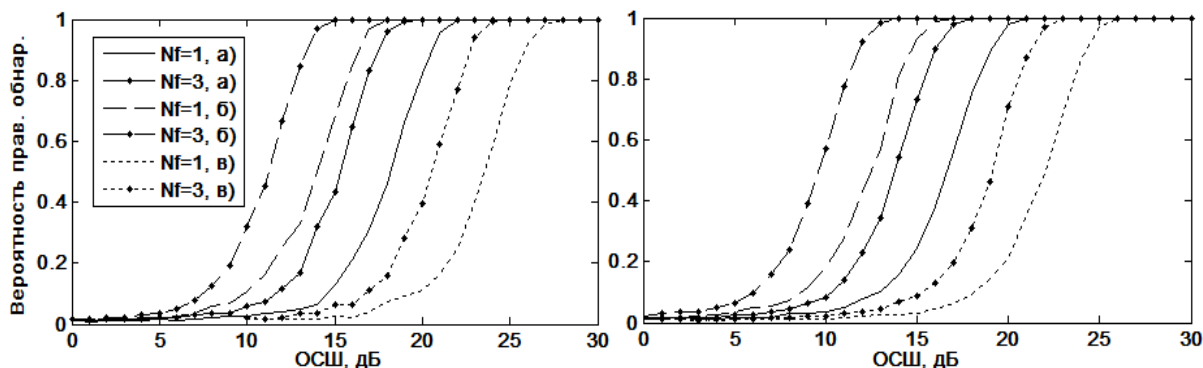


Рис. 1. Зависимости вероятности правильного обнаружения от ОСШ, построенные для разного количества рабочих частот и величин возмущения, соответствующих рис. 1.4. Показан результат для случая неизвестного поля источника (слева) и известного поля источника при отсутствии возмущения (справа). Nf – число используемых частотных полос.

Как видно из сравнения графиков, требуемое ОСШ уменьшается на 1–2 дБ. Таким образом, необходимое ОСШ при максимальном возмущении и трех частотных полосах составляет 12–13 дБ.

В §1.4 проведена первичная обработка экспериментальных данных. Предложено 3 варианта возможного обнаружения возмущения:

- а) визуальное сравнение СКО разности фаз для трёх типов сигналов;
- б) с помощью предложенного обобщённого критерия отношения правдоподобия;
- в) при помощи Т-квадрат критерия Хотеллинга, который является частным случаем обобщённого критерия отношения правдоподобий.

В §1.5 рассчитывается оценка характеристик обнаружения для частного случая задачи. Показано, что в ситуации, когда σ_0^2, σ_1^2 известны и равны³, а также $K_0 = K_1$, порог обнаружения L_0 и вероятность правильного обнаружения P_d при заданной вероятности ложной тревоги P_{fa} находятся по следующим формулам:

$$L_0 = \sqrt{2N} \operatorname{erf}^{-1}(1 - 2P_{fa}) + N,$$

³ Эти предположения вполне могут быть выполнены на практике. Так, интенсивность аддитивной помехи может быть известна из предварительных измерений. Это значение может слабо меняться во времени, так что для двух наборов наблюдений его можно считать одним и тем же.

$$P_d = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{L_0 - E\{F\}}{\sqrt{2D\{F\}}} \right) \right],$$

где $E\{F\}$ и $D\{F\}$ – математическое ожидание и дисперсия логарифма отношения правдоподобия F , $\operatorname{erf}(\cdot)$ и $\operatorname{erf}^{-1}(\cdot)$ – функция ошибок и обратная функция ошибок соответственно

В §1.6 приведено заключение к первой главе.

Во **второй главе** рассматривается задача пространственной локализации набора источников звука с использованием гибких микрофонных антенных решеток. В начале решается вспомогательная задача определения координат микрофонов за счет использования калибровочных источников звука. Она решалась путем оптимизации по неизвестным координатам калибровочных источников и микрофонов целевой функции, представляющей собой норму разницы измеренных и модельных задержек прихода калибровочных сигналов от источников к микрофонам. Представлены результаты моделирования и эксперимента, показавшие приемлемую эффективность предложенного метода калибровки. Для построения акустических изображений были использованы методы MUSIC и МПКС (максимально правдоподобной классификации сигналов). Первый метод широко известен и применялся ранее для оценки направления прихода плоских волн. Второй метод был недавно предложен и основан на модели помехи, включающей M источников когерентного поля. В работе были получены результаты локализации акустических источников с помощью численного моделирования, а также с помощью эксперимента в безэховой камере. Было показано, что метод МПКС обладает лучшим, чем метод MUSIC, пространственным разрешением.

В §2.1 приводится метод определения координат приемных элементов с использованием калибровочных источников. Он основан на решение нелинейной системы уравнений, связывающих координаты источников и приемников, методом Нелдера-Мида с постепенным увеличением числа неизвестных, т.е. на первом шаге решается система уравнений для небольшого количества источников и приемников, на последующих шагах число приемников и источников постепенно увеличивается. Для апробации предложенного метода определения координат микрофонов было проведено численное моделирование. Для оценки эффективности сходимости алгоритма вычислялось среднее квадратическое s_d разности истинных и вычисленных координат источников и микрофонов. Для начального приближения среднее квадратическое s_d равнялось 4 см. Предложенный метод показал хорошую сходимость и точность определения координат микрофонов. На рис. 2. приведена зависимость s_d от номера итерации.

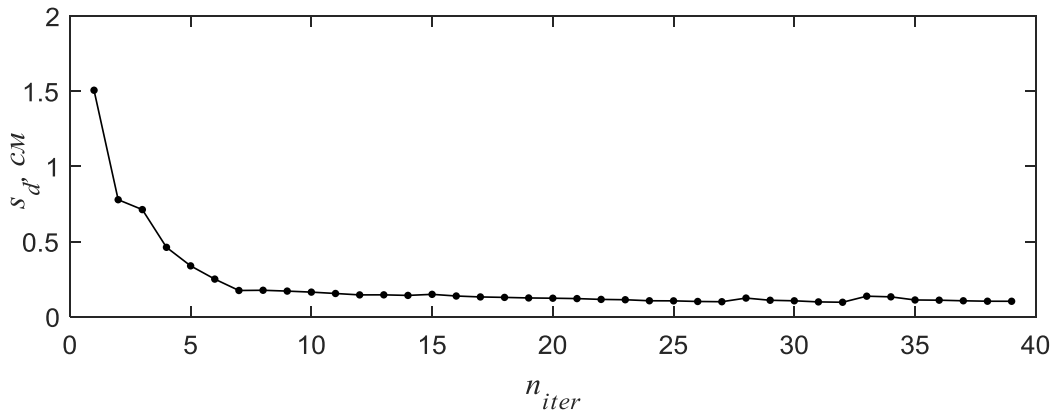


Рис. 2. Среднее квадратическое s_d разности вычисленных и истинных координат микрофонов и калибровочных источников в зависимости от номера итерации.

Видно, что ошибка определения координат достаточно быстро уменьшается и s_d сходится к значению 0.15 см, которое составляет 1.5% от межэлементного расстояния (9.8 см).

В §2.2 описывается модель принимаемого сигнала и приводятся методы построения акустических изображений. В частности, сравниваются результаты работоспособности недавно предложенного метода обработки сигналов максимально правдоподобная классификация сигналов (МПКС) с широко известным методом MUSIC. Метод МПКС основан на предположении, что часть корреляционной матрицы помехи, отвечающей за распределенные в пространстве источники, состоит из ограниченного числа матриц единичного ранга (диад). При этом векторы, из которых составлены данные диады, без ограничения общности можно считать ортогональными.

В §2.3 приведены результаты численного моделирования и экспериментальная апробация предложенных методов. Для разрешения источников в акустических изображениях и метода автоматического определения координат решетки микрофонов, предложенных в работе, был проведен эксперимент в безэховой камере. В эксперименте использовалась АР, в которой микрофоны располагались на гибком кабеле, позволяющем достаточно свободно создавать требуемую для измерений конфигурацию приёмной системы. Прямое измерение положения микрофонов для использованной конфигурации довольно затруднительно. Поэтому для этой задачи использовался предложенный в §2.1 метод. В качестве источников, для которых строился акустический портрет, использовался набор акустических динамиков, на вход которых подавались независимые между собой сигналы, представляющие широкополосный белый гауссовский шум. Для частоты выбранной частоты $f_0 = 2.3$ кГц характерная величина пространственного разрешения в рассматриваемой конфигурации составляет примерно $\lambda R^2/D^2 = 0.42$ м (где R – дистанция от центра антенны до источника, D – эффективный размер апертуры антенны, $\lambda = c/f_0$ – длина волны), что больше выбранного расстояния между

источниками (24 см). Для демонстрации преимущества метода МПКС перед другими методами было искусственно добавлено к принятому сигналу некоррелированный на элементах белый шум определенной мощности. При определенном значении его интенсивности метод МПКС позволяет разрешить два источника, в отличие от других рассмотренных адаптивных методов.

В §2.4 представлено заключение по второй главе.

В **третьей главе** исследованы возможности неэквидистантных разреженных планарных антенных решеток (АР) для решения задач обнаружения и оценки параметров источников. Для синтеза неэквидистантных АР с желаемыми характеристиками применен предложенный ранее для линейных АР метод, основанный на случайных бросаниях положения элементов при фиксации среднего межэлементного расстояния. Показано, что этот метод позволяет успешно синтезировать и планарные разреженные антенны, для которых при незначительном увеличении отношения «сигнал-шум», характеристики обнаружения сохраняются такими же, что и для эквидистантной антенны. Для количественного описания возможностей планарной разреженной антенной решетки в работе используется ранее предложенная характеристика – вероятность аномальной ошибки и указана методика её расчёта.

В §3.1 приводится диаграмма направленности плоской разряженной антенной решетки. Так как положение приемных элементов АР задаются случайно, то для дальнейшего анализа результатов можно найти среднюю диаграмму направленности. С помощью определения и свойств математического ожидания данная процедура была проделана. Было показано, что максимальное значение достигается при координатах, соответствующих истинному угловому источнику, и равно 1. При этом важной характеристикой ДН является уровень боковых лепестков (УБЛ), который напрямую влияет на точность пеленгации источников. В частности, наиболее важно максимальное значение УБЛ ($УБЛ_{max}$). По этой причине был проведен анализ средней диаграммы направленности и выявлены области с наибольшими значениями УБЛ.

В §3.2 для исследования свойств разреженных планарных АР вводится понятие вероятности аномальной ошибки. Вероятность аномальной ошибки P_a – вероятность события, при котором мы определяем хотя бы одну координату источника неверно. Для разных значений $УБЛ_{max}$ построены зависимости аномальной ошибки от отношения сигнал/шум ($ОСШ$). Показано, что при $УБЛ_{max} < 0.81$ пороговое значение вероятности почти не зависит от $УБЛ_{max}$.

В §3.3 приведено заключение к третьей главе.

Основные результаты работы

1. Предложен алгоритм обнаружения возмущения профиля скорости звука, основанный на наиболее общей модели принимаемого сигнала и использующий обобщенный критерий отношения правдоподобия.

2. С помощью численного моделирования показана возможность обнаружения возмущений разных типов, для каждого из которых установлено своё предельное значение ОСШ. На данных озерного эксперимента показана возможность обнаружения возмущений с помощью предложенного алгоритма.

3. Рассмотрены вопросы влияния на предельное ОСШ информации о виде возмущенного и невозмущенного поля на приемной антенне, а также количества используемых частотных полос. Для частного случая известных и равных интенсивностей фонового шума дана интуитивная интерпретация работы предложенного критерия. Найдены параметры, от которых целиком зависят характеристики обнаружения. Это позволяет проводить оценку этих характеристик для любого возмущения без выполнения вычислительно затратного численного моделирования.

4. Разработан метод, использующий калибровочные источники акустических ЛЧМ импульсов с последующим подбором координат микрофонов и источников для оптимизации целевой функции, являющейся нормой разницы векторов измеренных и модельных задержек распространения импульсов (между источниками и микрофонами). Предложенный метод оптимизации основан на пошаговом увеличении числа неизвестных (координат микрофонов и калибровочных источников) с использованием на каждом последующем шаге результатов, полученных на предыдущем шаге, в качестве начального приближения. Численно и экспериментально показано, что предложенный метод позволяет оперативно и с высокой точностью определять положения приёмников. Получаемая точность измерения координат позволяет обеспечить сверхразрешение близких источников.

5. Исследованы характеристики планарных неэквидистантных разреженных антенных решеток. Была исследована диаграмма направленности таких решеток, в частности особое внимание было уделено уровням боковых лепестков (УБЛ). Была построена зависимость вероятности аномальной ошибки от значения отношения сигнал/шум для различных значений максимального УБЛ.

Проведенные в работе исследования по обнаружению возмущения в среде могут быть использованы при создании гидроакустических систем. Разработанный метод обнаружения может быть использован в задачах исследования внутренних волн для определения влияния последних на прохождение акустического сигнала. Метод нахождения координат приемных элементов с использованием калибровочных источников может применяться в микрофонных антеннах с целью определения местоположения элементов антенны. Исследуемые характеристики планарных разреженных антенных решеток могут позволить успешно синтезировать такие системы и значительно расширить частотный диапазон исследуемых сигналов. Однако стоит отметить, что третья глава нуждается в доработке. На следующем этапе будет рассмотрена задача нахождения максимальной апертуры планарной разреженной

антенной решётки с фиксированным числом элементов, для которой сохраняются приемлемые характеристики обнаружения источников сигналов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Родионов А.А., Савельев Н.В. Обнаружение локального возмущения профиля скорости звука в мелком море с помощью вертикальной антенной решетки по набору принимаемых тональных сигналов // Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2016). Санкт-Петербург, 2016, стр. 278–281.
2. Родионов А.А., Савельев Н.В. Обнаружение локального возмущения профиля скорости звука в мелком море с помощью вертикальной антенной решетки // Научно-техн. сб. Гидроакустика. 2017. Вып. 29(1). С. 70–79.
3. Родионов А.А., Савельев Н.В. Исследование возможности обнаружения локального возмущения профиля скорости звука в мелком море для разных моделей полезного сигнала // Труды II Всероссийской акустической конференции, Нижний Новгород, 6-9 июня 2017, с. 1083–1090.
4. Направлена заявка на регистрацию программы для ЭВМ «ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ СРЕДЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ» в роспатент.
5. Иваненков А.С., Родионов А.А., Савельев Н.В. Определение координат микрофонов гибкой антенной решетки методом акустической калибровки // XXIV Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки). Нижний Новгород. 21-24 мая 2019 года.
6. А.С. Иваненков, А.А. Родионов, Н.В. Савельев Сверхразрешение близких источников в задаче построения акустических изображений с помощью метода максимального правдоподобия // XXXII Сессия РАО, Москва 14-18 октября 2019 г.
7. Родионов А.А., Семенов В.Ю., Савельев Н.В., Коновалов К.С. Локализация неподвижного источника звука с использованием некогерентного апертурного синтеза с одновременным подавлением помех // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 2. С. 126–135.
8. А.С. Иваненков, А.А. Родионов, Н.В. Савельев Построение акустических изображений с помощью гибких микрофонных антенных решеток с использованием сверхразрешающих методов (в печати журнала «Известия вузов. Радиофизика»).

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
2. Widrow B., Stearns S.D. Adaptive signal processing. Prentice-Hall, 1985.
3. Compton R.T. Adaptive Antennas: Concepts and Performance. Prentice Hall, 1988.
4. Van Trees H.L. Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part IV, Optimum Array
5. Т. Г. Талипова Механизмы образования внутренних «волн-убийц» // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2011, т. 4, № 4, с. 58–70.
6. А.А. Аредов, Н.Н. Галыбин, А.В. Фурдуев Акустико-океанологический эксперимент по регистрации внутренних волн // Акустический журнал, 1993, т.39, № 4, с.584–591.
7. Ian F. Akyildiz, Dario Pompili, Tommaso Melodia Underwater acoustic sensor networks: research challenges // Ad Hoc Networks 3 (2005), p. 257–279.
8. Горская Н.В., Горский С.М., Зверев В.А., Николаев Г.Н., Курин В.В., Хилько А.И. Коротковолновая дифракция в многомодовом слоистом волноводе // Акустический журнал, 1988, т. 34, № 1, с.55–59.
9. Матвеев А.Л., Орлов Д.А., Родионов А.А., Салин Б.М., Турчин В.И. Сравнительный анализ томографических методов наблюдения неоднородностей в условиях мелкого моря // Акустический журнал, 2005, т. 51, № 2, с. 268–279.
10. Abel J. S., Bryan N. J., Skare T., Kolar M., Huang P., Mostowfi D., Smith J.O. A Configurable Microphone Array with Acoustically Transparent Omnidirectional Elements / 127th Audio Engineering Society Convention. New York, USA, 9-12 October, 2009. P. 826-836.
11. Goseki, M., Ding, M., Takemura, H., Mizoguchi, H. Combination of microphone array processing and camera image processing for visualizing sound pressure distribution / Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Anchorage, USA, 9-12 Oct, 2011. P. 139–143.
12. Heilmann, G., Meyer, A. Time-domain Beamforming using 3D-microphone arrays / Proceedings of the Berlin Beamforming Conference. Berlin, Germany, 19–20 February, 2008. Art. no. 4.
13. Padois T., Berry A. Application of acoustic imaging techniques on snowmobile pass-by noise // The Journal of the Acoustical Society of America. 2017. V 141, №2. P. 134–139.
14. Siller H., Drescher M. Saueressig G., Lange R. Fly-over source localization on a boeing 747-400 / Proceedings of the Berlin Beamforming Conference. Berlin, Germany, 21–24 February, 2010. Art. no. 13.

15. Stoica P., Nehorai A. MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1989. V 37, №5. P 720–741.
16. Stoica P., Handel P., Soderstrom T. Study of Capon method for array signal processing // Circuits, Systems, and Signal Processing. 1995. V 14, № 6. P 749–770.
17. Родионов А.А., Турчин В.И. Обработка сигналов в антенных решётках на основе модели помехи, включающей корреляционную матрицу неполного ранга // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 1. С. 60–71.
18. Dobler D., Heilmann G., Ohm M. Automatic Detection of Microphone Coordinates // Proceedings of the Berlin Beamforming Conference. Berlin, Germany, 24–25 February, 2010. Art. no. 15.
19. Leahy R.M., Jeffs B. D. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1991. V. 39, No. 8. P. 1 178.
20. Vucci O. M., D’Urso M., Isernia T., et al. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 2010. V. 58, No. 6. P. 1949.
21. Турчин В.И., Родионов А.А. Обнаружение и пеленгация источников с использованием разреженных антенных решеток // Изв. Вузов. Радиофизика, 2018. Т. 61. № 2. С. 122–140.