

УДК 621.396.6

ЛОКАЛИЗАЦИЯ НЕПОДВИЖНОГО ИСТОЧНИКА ЗВУКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕКОГЕРЕНТНОГО АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗА С ОДНОВРЕМЕННЫМ ПОДАВЛЕНИЕМ ПОМЕХ

А. А. Родионов¹, В. Ю. Семенов^{1,2}, Н. В. Савельев¹, К. С. Коновалов¹*

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В работе рассматривается задача шумопеленгации покоящегося источника звука с использованием апертурного синтеза. При этом предполагается, что излучаемый источником сигнал является некогерентным во времени. Такой сценарий наиболее интересен с практической точки зрения, т. к. реальные источники имеют в основном непрерывный спектр излучения. Считалось, что на приёмную систему помимо шумов моря воздействует также помеха, вызванная работой механизмов внутри корабля-носителя (бортовая помеха), мощность которой значительно превышает мощность полезного сигнала. Представлены результаты апробации предложенных алгоритмов на данных численного и озёрного экспериментов. Было показано, что, в зависимости от длины и типа траектории корабля-носителя, достигаются различные точности измеренных координат покоящегося источника.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач гидроакустики в настоящее время является определение координат покоящегося источника звука с помощью движущегося корабля-носителя бортовой приёмной антенной решётки. Решение задачи в такой постановке достигается методами апертурного синтеза. Например, в работах [1–6] рассматриваются способы локализации тональных (когерентных) источников, т. е. методы когерентного апертурного синтеза. В работах [7, 8] показана возможность апертурного синтеза по частично-когерентному сигналу от покоящегося источника даже при наличии одного гидрофона в антенной решётке. Случай апертурного синтеза по полностью некогерентному во времени сигналу пока исследован недостаточно. Один из методов полностью некогерентного апертурного синтеза при использовании антенной решётки предложен и апробирован в работе [9]. Следует отметить, что в практических сценариях на борту корабля-носителя присутствуют различные помехи. В частности, могут иметь место пространственно-когерентные помехи, связанные с работой механизмов корабля-носителя. Также всегда присутствует помеха, обусловленная шумом моря. Отметим, что в настоящее время публикации, в которых предлагаются методы некогерентного апертурного синтеза при наличии на борту перечисленных типов помех, отсутствуют. Исследованию именно такой практически важной ситуации посвящена данная работа.

Будем считать, что сигнал пеленгуемого источника является некогерентным во времени, т. е. представляет собой белый шум в некоторой полосе частот. Такой сценарий характерен для корабельного шума, который, как известно, всегда имеет непрерывную компоненту спектра [10]. Для того чтобы выделить этот шумоподобный сигнал на фоне помех, предлагается проводить обработку сигналов в каждой узкой полосе частот в широком частотном диапазоне с последующим накоплением и по частоте, и во времени (за счёт апертурного синтеза).

Для апертурного синтеза будем использовать антенную систему из двух одинаковых линейных эквидистантных антенных решёток. Антенные решётки располагаются по правому и левому бортам корабля-носителя. На борту носителя антенной системы предполагалось присутствие

* vitali.semenov@gmail.com

мощной помехи, моделируемой набором сферических волн и создаваемой работающими механизмами, что адекватно описывает реальную ситуацию. В работе предлагается метод апертурного синтеза, включающий в себя адаптивное подавление бортовых помех. Отметим также, что предлагаемый метод апертурного синтеза пригоден для произвольного вида траектории корабля-носителя. В работе исследованы две различные траектории движения приёмной системы — по прямой и окружности. Проводится сравнение потенциальных возможностей адаптивного апертурного синтеза для этих траекторий.

1. АЛГОРИТМ ШУМОПЕЛЕНГАЦИИ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ПОДАВЛЕНИЕМ БОРТОВЫХ ПОМЕХ

На некотором временном интервале, когда можно пренебречь движением корабля носителя, будем рассматривать последовательность векторов $\mathbf{x}_j$ (где $j = 1, \dots, J$ — номер временного отсчёта), представляющих сигналы на выходе N -элементной антенной решётки с одного из бортов корабля-носителя:

$$\mathbf{x}_j = \boldsymbol{\tau}_j + \boldsymbol{\xi}_j \equiv \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_j + \boldsymbol{\xi}_j, \quad j = 1, \dots, J, \quad (1)$$

где $\mathbf{s}_j$, $\mathbf{n}_j$ и $\boldsymbol{\xi}_j$ — полезный сигнал, фоновый шум и помеха соответственно; все они являются белым гауссовым шумом с нулевым средним, J — число временных отсчётов.

В таком случае векторы $\mathbf{x}_j$ с размерностями $N \times 1$ распределены по нормальному закону, статистически независимы, $E\{\mathbf{x}_j \mathbf{x}_k^H\} = \mathbf{0}$ (при $j \neq k$), имеют нулевые средние $E\{\mathbf{x}_j\} = \mathbf{0}$ и корреляционную матрицу $\mathbf{K} = E\{\mathbf{x}_j \mathbf{x}_j^H\} = \mathbf{0}$; здесь E — математическое ожидание, индекс H означает эрмитово сопряжение. Корреляционную матрицу $\mathbf{K}$ можно представить суммой

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_\theta + \mathbf{K}_i, \quad (2)$$

где $\mathbf{K}_\theta = E\{\boldsymbol{\tau}_j \boldsymbol{\tau}_j^H\}$ — корреляционная матрица, определяемая смесью «полезного» сигнала и фонового шума и зависящая от вектора неизвестных параметров $\boldsymbol{\theta}$, который включает параметры, характеризующие «полезный» источник, например его пеленг и интенсивность, и параметры фонового шума; $\mathbf{K}_i = E\{\boldsymbol{\xi}_j \boldsymbol{\xi}_j^H\}$ — корреляционная матрица помехи.

В этом случае логарифм функции правдоподобия для этой модели равен [11]

$$\Lambda(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{K}_i) = -J \left\{ \ln \det(\mathbf{K}_\theta + \mathbf{K}_i) + \text{tr}[(\mathbf{K}_\theta + \mathbf{K}_i)^{-1} \hat{\mathbf{K}}] \right\}, \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{K}} = J^{-1} \sum_{j=1}^J \mathbf{x}_j \mathbf{x}_j^H$ — выборочная корреляционная матрица принятого сигнала. Следует отметить, что в ситуации, когда матрица $\mathbf{K}_i$ является произвольной и полностью неизвестной, однозначная оценка вектора параметров $\boldsymbol{\theta}$ невозможна [12]. Для получения разумного решения задачи введём некоторое ограничение на матрицу помехи $\mathbf{K}_i$. Будем считать, что её ранг меньше числа гидрофонов в антенной решётке. При этом $\mathbf{K}_i$ можно представить в виде суммы диад $\sum_{m=1}^M \mathbf{a}_m \mathbf{a}_m^H$, составленных из произвольных и неизвестных векторов направлений $\mathbf{a}_m$ (для сферических, плоских волн и т. д.)¹. Параметр M имеет физический смысл числа источников присутствующих бортовых помех. Такое описание соответствует абсолютно произвольному набору M мешающих источников (помех). Далее используется идея, заключающаяся в том, что эти источники (которые изначально не ортогональные) можно считать ортогональными, т. к. указанная матрица $\sum_{m=1}^M \mathbf{a}_m \mathbf{a}_m^H$ допускает представление через свои собственные числа и векторы [13], которые ортогональны. Кроме того, существует процедура ортогонализации Грамма—Шмидта

¹ При этом в конкретной рассматриваемой задаче ни один из векторов направлений помехи не может совпадать с вектором направлений полезного сигнала, т. к. бортовые помехи находятся внутри корабля-носителя.

неортогонального базиса векторов, которая была успешно применена в похожей задаче подавления помех в радиолокации [14]. Таким образом, корреляционную матрицу бортовых помех можно привести к виду

$$\mathbf{K}_i = \sum_{m=1}^M \mathbf{e}_m \mathbf{e}_m^H, \quad M < N, \quad (4)$$

где $\mathbf{e}_m$ — вектор направлений, включающий комплексную амплитуду помехи и соответствующий некоторой эквивалентной m -й помехе, $\mathbf{e}_m^H \mathbf{e}_{m'} = 0$ при $m \neq m'$.

В таком случае удаётся найти частные максимумы функции правдоподобия (3) по $\mathbf{e}_m$ путём решения уравнений $\partial \Lambda / \partial \mathbf{e}_m = 0$. После максимизации функции правдоподобия по неизвестным векторам $\mathbf{e}_m$ с учётом (4) получаем [12]

$$\begin{aligned} \Lambda &= -J \left\{ \ln \det(\mathbf{K}_\theta + \sum_{m=1}^M \mathbf{e}_m \mathbf{e}_m^H) + \text{tr}[(\mathbf{K}_\theta + \sum_{m=1}^M \mathbf{e}_m \mathbf{e}_m^H)^{-1} \hat{\mathbf{K}}] \right\} \rightarrow \max_{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_M} \Lambda \equiv \\ &\equiv \Lambda_{\mathbf{A}}(\theta) = -J \left\{ \sum_{m=M+1}^N [\lambda_m(\theta) - \ln \lambda_m(\theta)] + M + \ln \det \hat{\mathbf{K}} \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\lambda_m(\theta)$ — собственные числа матрицы $\mathbf{M}_\theta^{-1} = \hat{\mathbf{K}}^{1/2} \mathbf{K}_\theta^{-1} \hat{\mathbf{K}}^{1/2}$. Тогда для оценки вектора полезных параметров $\hat{\theta}$ необходимо найти экстремум

$$\hat{\theta} = \max_{\theta} \Lambda_{\mathbf{A}}(\theta). \quad (6)$$

Подход (4)–(6) подробно изложен в статье [12] и называется методом максимально правдоподобной классификации сигналов (МПКС).

Рассмотрим частный случай, когда на антенну, помимо фоновых шума и бортовой помехи, поступает полезный сигнал только от одного источника. Тогда

$$\mathbf{K}_\theta = \sigma_0^2 \mathbf{I} + \sigma_1^2 \boldsymbol{\mu}(\theta) \boldsymbol{\mu}(\theta)^H, \quad (7)$$

где σ_0^2 — интенсивность фоновых некоррелированного шума, σ_1^2 — интенсивность полезного сигнала, $\boldsymbol{\mu}(\theta)$ — вектор направлений полезного сигнала, $\mathbf{I}$ — единичная матрица. Для этого сценария из (6) можно исключить ещё один параметр (σ_0^2) путём решения уравнения $\partial \Lambda_{\mathbf{A}} / \partial \sigma_0^2 = 0$. При этом удобно перейти к новому параметру $\beta = \sigma_1^2 / \sigma_0^2$ — отношению интенсивности полезного сигнала к фоновому шуму. Тогда (5) преобразуется к виду

$$\Lambda_0(\beta, \theta) = \max_{\sigma_0^2} \Lambda_{\mathbf{A}}(\theta) = -J \left[(N - M) \ln \sum_{m=M+1}^N c_m(\theta) - \sum_{m=M+1}^N \ln c_m(\theta) + M \ln \det \hat{\mathbf{K}} \right], \quad (8)$$

где $c_m(\theta)$ — собственные числа матрицы $\mathbf{C}_\theta^{-1} = \hat{\mathbf{K}}^{1/2} [\mathbf{I} + \beta \boldsymbol{\mu}(\theta) \boldsymbol{\mu}(\theta)^H]^{-1} \hat{\mathbf{K}}^{1/2}$. В результате задача оценки пеленга полезного источника и отношения его интенсивности к интенсивности фоновых шума сводится к поиску максимума функционала:

$$\hat{\Lambda}(\hat{\beta}, \hat{\theta}) = \max_{(\beta, \theta)} \Lambda_0(\beta, \theta). \quad (9)$$

Добавим здесь некоторые разъяснения по важному вопросу выбора эффективного числа помех M . Дело в том, что в рассматриваемой задаче источник полезного сигнала единственный, а число гидрофонов N весьма велико (в современных акустических комплексах может достигать сотни), поэтому имеется значительная степень свободы в выборе параметра M . При этом число

бортовых помех, как показывают эксперименты, не бывает слишком большим (число эквивалентных источников не превышает пары десятков), поэтому можно выбирать параметр M заведомо большим, чтобы гарантированно попасть в шумовое подпространство. В этом случае в качестве помех будут также рассматриваться собственные векторы выборочной матрицы, соответствующие фоновому шуму, что может несколько понизить точность оценки пеленга, но не повлияет на результат качественно.

Поиск экстремума в (9) ведётся в узкой полосе частот. Для того чтобы перейти к использованию широкой полосы частот, предлагается для каждой полосы и значения θ найти частный максимум (8) по β (например, перебором), значение которого будет $\hat{\beta}_k(\theta)$, после чего подставить его в (8) и просуммировать получившуюся величину по поддиапазонам частот:

$$\Lambda_{WB}(\theta) = \sum_{k=1}^Q \Lambda_{0,k}(\hat{\beta}_k, \theta), \quad (10)$$

где Q — число частот f , k — номер частотного поддиапозона. Тогда поиск максимума по вектору неизвестных параметров θ необходимо вести уже у широкополосного функционала:

$$\hat{\Lambda}_{WB}(\hat{\theta}) = \max_{\theta} \Lambda_{WB}(\theta). \quad (11)$$

Следует отметить, что такой подход будет оптимальным в случае, когда принимаемые сигналы в разных частотных полосах будут независимыми. Это утверждение следует из того, что оценка (9) получена из метода максимального правдоподобия. Предложенный алгоритм (11) в известной степени идейно близок к методу MUSIC [11], который также требует априорного знания числа M действующих помех (или использования дополнительного метода для определения M). При этом метод MUSIC не обеспечивает оптимальности при суммировании целевой функции по частоте.

2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕКОГЕРЕНТНОГО АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗА

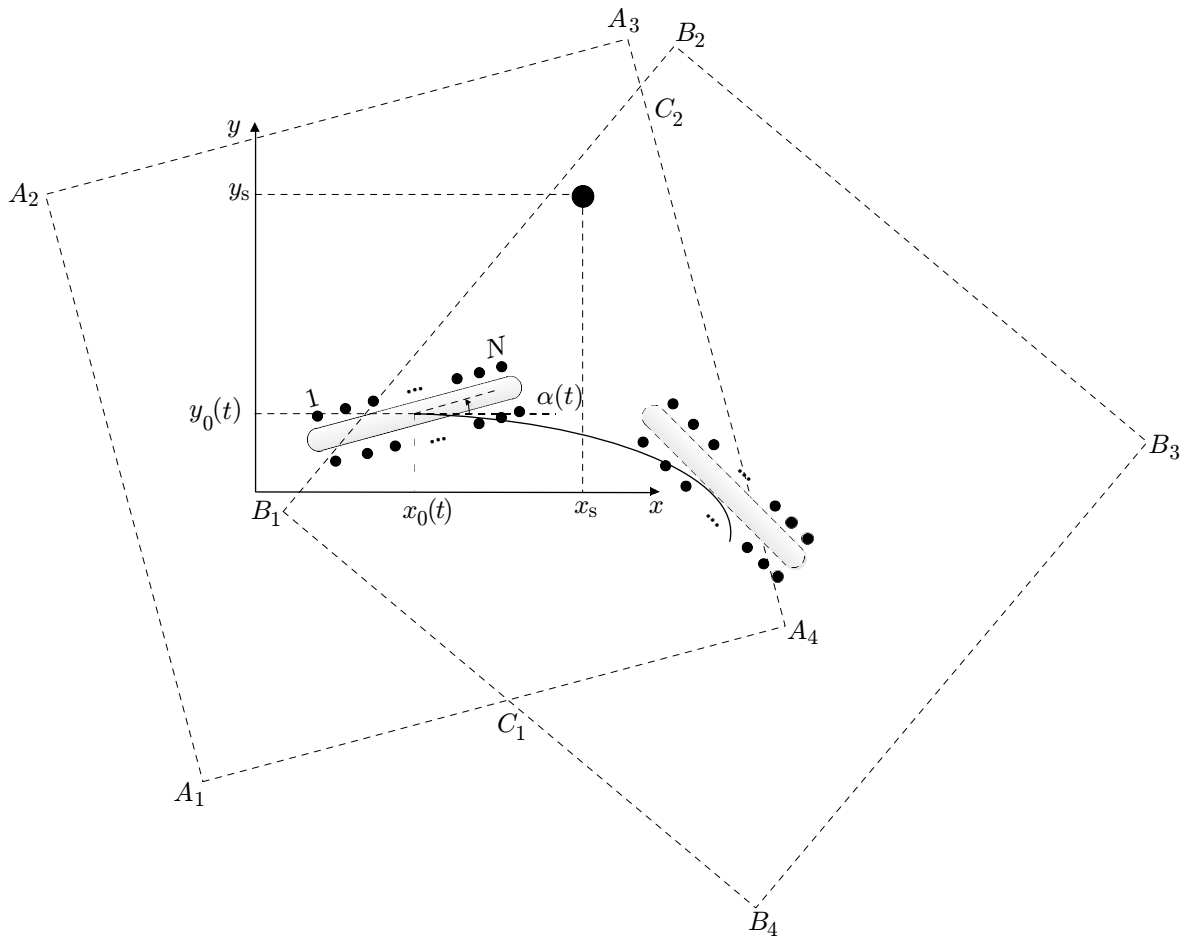
Апертурный синтез предлагается выполнять с помощью измеренного как функции времени пеленга цели по максимуму функции неопределённости, формирование которой описывается ниже. Для измерения пеленга воспользуемся методом МПКС, изложенным в разделе 1. Основными достоинствами этого метода являются возможности адаптивно подавлять бортовые помехи и пеленговать цель при малых отношениях сигнал/шум (ОСШ). К его недостаткам можно отнести повышенную вычислительную сложность.

Для установления текущих координат покоящегося источника сигнала будем вести оптимизацию целевой функции по двум параметрам, а именно начальным координатам источника $\psi = \{x_s, y_s\}$. Это единственные два неизвестных параметра, которые полностью определяют взаимное расположение источника и приёмной системы во времени (остальные параметры известны). Двумерная геометрия взаимного расположения объектов изображена на рис. 1.

Введём в рассмотрение две системы координат: глобальную (xOy) и локальную ($x'O'y'$). Локальная система координат привязана к корпусу корабля-носителя. Тогда в глобальной системе координаты гидрофонов даются формулами

$$x_n(t_j) = x_0(t_j) + p_n \cos[\alpha(t_j)], \quad y_n(t_j) = y_0(t_j) + p_n \sin[\alpha(t_j)], \quad (12)$$

где $p_n = [n - (N + 1)/2]d$, $n = 1, \dots, N$; $\{x_0(t_j), y_0(t_j)\}$ — текущие координаты центра антенной решётки, $\alpha(t_j)$ — текущий угол наклона этой решётки относительно оси Ox , d — межэлементное расстояние.

Рис. 1. Зоны апертурного синтеза для двух моментов времени t

В качестве модели сигнала, приходящего от покоящегося источника на каждый из гидрофонов, будем использовать модель [15]

$$\mu_j = \|\exp[2\pi i f(t_j - \rho_{n,j}/c)]\|_{n=1,\dots,N}, \quad \rho_{n,j} = \sqrt{[x_s - x_n(t_j)]^2 + [y_s - y_n(t_j)]^2}, \quad (13)$$

где $\{x_s, y_s\}$ — декартовы координаты покоящегося источника в глобальной системе координат, c — скорость звука в воде. Тогда для предлагаемого метода апертурного синтеза функция неопределённости с учётом (8) в k -й узкой полосе частот ширины Δf определяется как

$$F_{k,\Delta f}(\psi, t_j) = \Lambda_{0,k}(\hat{\beta}_k, \psi), \quad (14)$$

где $\psi = \{x_s, y_s\}$ — вектор неизвестных параметров, по которым будет проводиться апертурный синтез. Вектор ψ в данной ситуации выступает в качестве вектора из (7).

Поскольку и полезный сигнал, и бортовая помеха широкополосные, для каждого блока данных с длительностью T общий диапазон рассматриваемых частот ΔW предлагается делить на узкие полосы Δf и после этого суммировать функции неопределённости в этих полосах:

$$F^{(\Delta W)}(\psi, t_j) = \sum_{k=1}^Q F_{k,\Delta f}(\psi, t_j), \quad (15)$$

где Q — число поддиапазонов Δf , укладываемых в общую частотную полосу анализа ΔW . Выбор ширины узкой полосы частот определяется требованием неизменяемости комплексной огибающей падающей волны на апертуре антенной решётки ($\Delta f \ll c/D$), где c — скорость звука в воде, D — длина антенной решётки. Выбор длительности блока данных T снизу ограничивается необходимостью иметь минимум N отсчётов для вычисления невырожденной корреляционной матрицы, а сверху — $T \ll R/\gamma_r$, где R — минимальное расстояние от источника до приёмника, γ_r — тангенциальная скорость движения источника относительно корабля-носителя. Характерным значением параметра R/γ_r является 100 с и более.

В качестве альтернативы методу МПКС можно использовать известный адаптивный алгоритм шумопеленгации MUSIC. Функция неопределённости метода MUSIC в узкой полосе есть

$$F_{k,\Delta f}^{(\text{MUSIC})}(\psi, t_j) = \left[\sum_{n=M+1}^N |\mu_j^H(\psi) \mathbf{v}_n|^2 \right]^{-1}, \quad (16)$$

где M — размерность сигнального подпространства, $\mathbf{v}_n$ — n -й собственный вектор матрицы $\hat{\mathbf{K}}$. С помощью метода MUSIC также можно подавлять бортовые помехи. Для антенной решётки они являются сферическими волнами, в то время как источник полезного сигнала находится в дальней зоне и является плоской волной. Известно, что при бесконечном числе выборок метод MUSIC даёт бесконечный по амплитуде отклик лишь с того направления, откуда приходит плоская волна. С направлений, откуда приходят сферические волны, пусть даже большой мощности, формируются гладкие отклики много меньшей амплитуды, чем амплитуда отклика на плоскую волну.

Поскольку носитель антенной решётки движется и апертурный синтез происходит в локальной (бортовой) системе координат, для накопления функции неопределённости от текущего блока данных с длительностью T к следующему приходится проводить интерполяцию значений старой функции неопределённости в новых узлах сетки координат. При апробации метода использовалась сплайн-интерполяция 5-го порядка. При этом старые узлы сетки, которые не попадали в новую область поиска, просто удалялись из рассмотрения. В итоге процедура апертурного синтеза с помощью метода МПКС сводилась к максимизации по x_s и y_s суммы

$$\sum_j F^{(\Delta W)}(\psi, t_j). \quad (17)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЗЁРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Будем считать, что положение корабля-носителя в начальный момент времени совпадает с началом глобальной системы координат. При этом начальное положение его продольной оси (совпадающего с осями антенной решётки) параллельно оси абсцисс.

Для проверки эффективности предложенного метода ранее был проведён эксперимент на Ладожском озере. На борту макета корабля-носителя был установлен вибрационный источник широкополосного шума, который имитировал источник помехи корабля-носителя. Покоящийся полезный источник звукового шумоподобного сигнала находился на расстоянии около 150 м от корабля-носителя и был погружён в воду на глубину около 5 м. Мощность постановщика помехи на борту корабля-носителя была на 20 дБ больше, чем мощность генератора полезного сигнала. Макет корабля-носителя двигался равномерно и прямолинейно со скоростью 0,32 м/с. Каждая

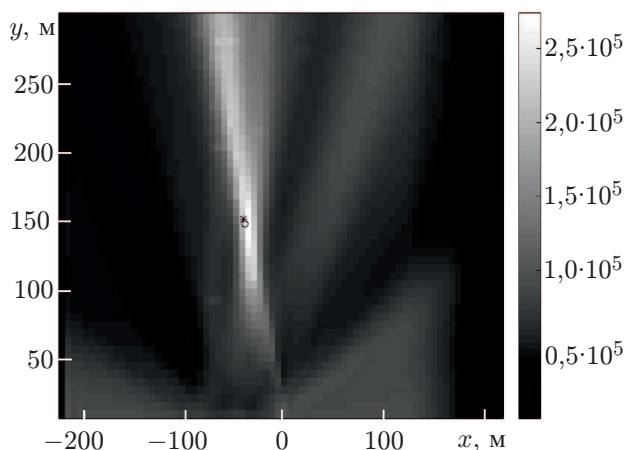


Рис. 2. Функция неопределённости для метода МПКС при прямолинейном движении корабля-носителя (символы $\circ$ и $*$ соответствуют измеренному и истинному положению)

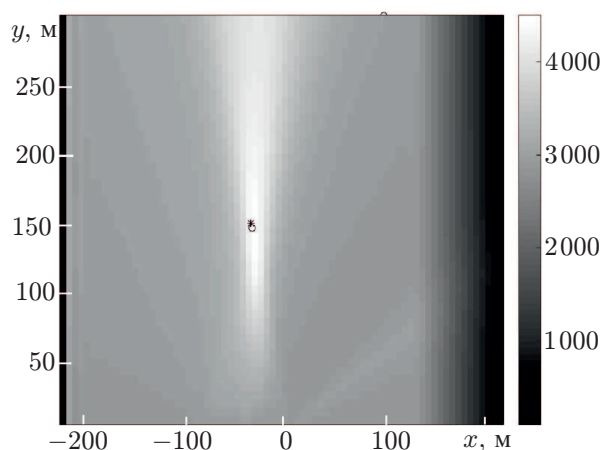


Рис. 3. Функция неопределённости для метода MUSIC при прямолинейном движении корабля-носителя (символы $\circ$ и $*$ соответствуют измеренному и истинному положению)

из двух антенных решёток состояла из $N = 32$ гидрофонов с межэлементным расстоянием $d = 0,2$ м. Длина временного интервала была выбрана равной $T = 10$ с, диапазон используемых частот составлял $550 \div 2350$ Гц.

На рис. 2 и 3 приведены графики формирующейся функции неопределённости спустя 300 с после начала апертурного синтеза для предлагаемого метода на основе МПКС и метода, основанного на MUSIC, соответственно. Как видно из рис. 2, для предложенного метода на основе МПКС формируется функция неопределённости с ярко выраженным чётким максимумом в месте расположения полезного источника, в то время как для метода MUSIC функция неопределённости более гладкая. Тем не менее, оба метода позволяют уверенно локализовать источник на фоне помехи.

Для оценки работоспособности предложенного метода апертурного синтеза для различных типов траекторий корабля-носителя (в том числе и криволинейных) было проведено дополнительное численное моделирование. Криволинейная траектория в виде окружности представлена на рис. 4. Озёрный эксперимент для криволинейных траекторий не проводился по причине технической трудности его организации. Считалось, что каждая антенная решётка состоит из $N = 32$ гидрофонов с межэлементным расстоянием $d = 0,2$ м. Источник излучал некогерентный во времени широкополосный сигнал (гауссов шум) с плоским фазовым фронтом (источник находился в дальней зоне антенной решётки). Полоса обработки составляла $\Delta W = 300 \div 1000$ Гц, а узкополосная обработка проводилась в полосе $\Delta f = 5$ Гц. Данные обрабатывались блоками с $T = 20$ с. Бортовая помеха моделировалась как широкополосный некогерентный во времени сигнал со сферическим фазовым фронтом. Скорость корабля-носителя равнялась 3 м/с. На рис. 5 приведены зависимости ошибки измерения начальных координат источника для круговой траектории с помощью методов МПКС и MUSIC. Шаг сетки поиска составлял 100 м, отношение сигнал/фоновый шум $\text{SNR} = 10$ дБ, отношение помеха/фоновый шум 30 дБ. Мощность помехи была на 20 дБ больше мощности полезного сигнала. Как видно из графиков, оба метода обеспечивают приемлемую точность. Однако необходимо отметить, что метод MUSIC работает только при правильном выборе параметра M , который на практике заранее неизвестен. При этом метод МПКС немного раньше по времени обеспечивает допустимую точность, чем метод MUSIC. На рис. 6 приведён график функции неопределённости при круговом движении корабля-носителя для предложенного метода МПКС.

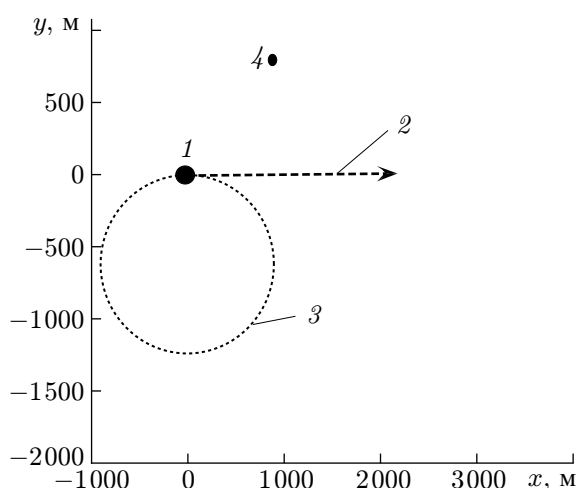


Рис. 4. Траектории корабля-носителя 1 (2 — линейная, 3 — круговая); 4 — источник

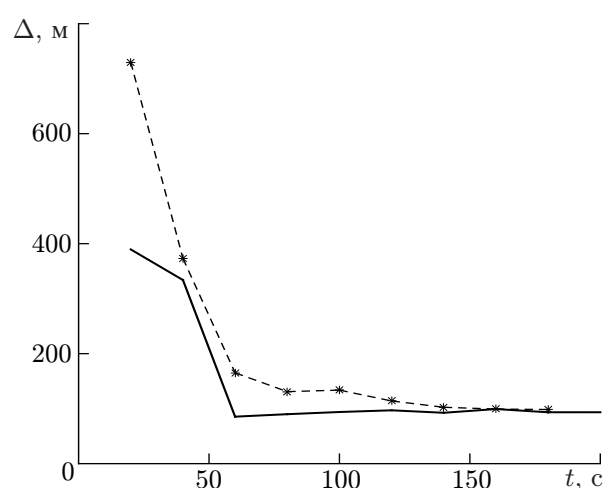


Рис. 5. Ошибка Δ измерения координат источника при круговом движении корабля-носителя (сплошная и штриховая линии соответствуют методам MUSIC и МПКС)

Следует отметить, что эффектом Доплера даже в случае криволинейного движения можно было пренебречь. Поскольку обработка ведётся в узких полосах частот, предполагается, что спектр там близок к постоянному. В такой ситуации уширение спектра за счёт доплеровского сдвига сложно учесть и использовать, т. к. оно может проявиться только на границе частотного диапазона полезного сигнала, причём эти границы должны быть достаточно резкими (чего не бывает на практике). Наличие эффекта Доплера в данном случае не влияет на качество локализации по причине малого фазового искажения полезного сигнала на бортовой антенне, поскольку выполняется условие $f_d \ll c/D$, где f_d — доплеровский сдвиг частоты.

На практике величина отношения помеха/фоновый шум может быть ещё больше. Этот случай также был численно промоделирован. На рис. 7 приведены зависимости ошибки измерения начальных координат источника для прямолинейной и круговой траекторий для обоих методов. Чёрные штриховые кривые 2 и 4 относятся к методу MUSIC для прямолинейной и круговой траекторий соответственно. Красные сплошные кривые 1 и 3 относятся к методу МПКС для прямолинейной и круговой траекторий соответственно. Величина отношения сигнал/шум составляет 10 дБ, отношения помеха/фоновый шум = 55 дБ, мощность помехи была на 45 дБ больше мощности полезного сигнала. Как видно из графиков, известный метод MUSIC даже при правильном выборе его параметра (размерности сигнального подпространства) вообще не работает. Предлагаемый метод апертурного синтеза посредством шумопеленгации методом МПКС обеспечивает приемлемую точность даже на фоне мощных помех. Можно предположить, что указанный эффект связан с небольшой декорреляцией сигнала за счёт конечности используемой частотной полосы. Следствием такой декорреляции является значительное увеличение эффективного числа источников помех при очень больших уровнях помехи.

Этот факт согласуется с результатами работы [12], в которой показано, что метод МПКС может значительно превосходить MUSIC по точности определения параметров сигналов при наличии помех.

Видно, что по сравнению с прямолинейной траекторией круговая траектория раньше по времени обеспечивает получение приемлемой точности. Таким образом, круговое движение предпочтительнее для некогерентного апертурного синтеза при приёме шумоподобных сигналов.

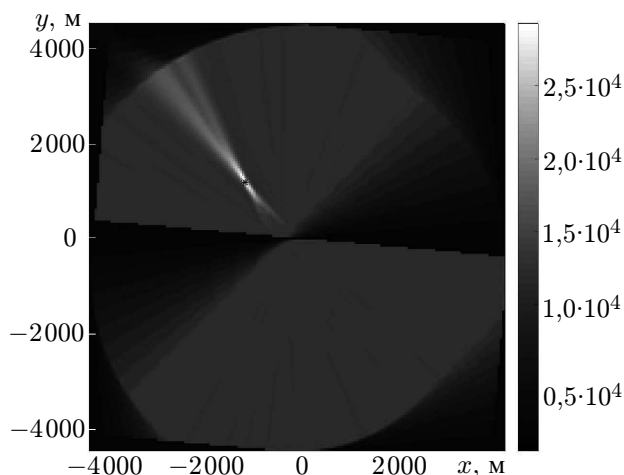


Рис. 6. Функция неопределённости для метода МПКС при круговом движении корабля-носителя

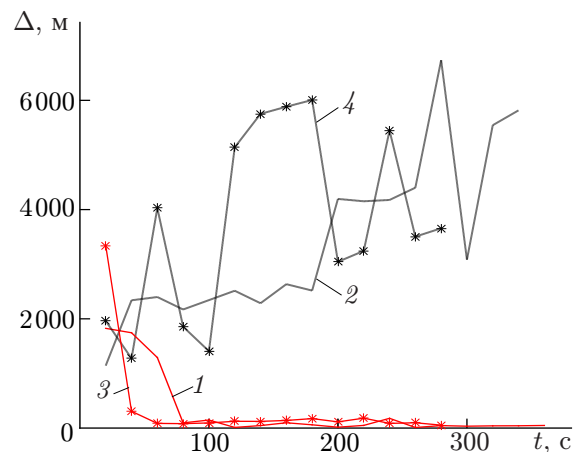


Рис. 7. Ошибка Δ измерения координат источника при прямолинейном (линии 1 и 2) и круговом (3 и 4) движении корабля-носителя с использованием методов MUSIC (чёрные штриховые линии) и МПКС (красные сплошные линии)

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод локализации широкополосного сигнала от покоящегося источника с помощью движущейся приёмной системы из двух линейных антенных решеток, расположенных по обоим бортам корабля-носителя, с использованием апертурного синтеза. Считалось, что на антенных решётках присутствовала мощная широкополосная некогерентная помеха, вызванная работой механизмов корабля-носителя. Предложенный метод основан на процедуре поиска максимума вводимой функции неопределённости, которая накапливается по времени и частоте и интерполируется во времени. Интерполяция необходима для представления результатов в движущейся системе координат (связанной с кораблём-носителем). Формирование функции неопределённости происходит с помощью предложенного ранее оригинального адаптивного алгоритма шумопеленгации МПКС. Приведены результаты обработки ранее полученных данных озёрного эксперимента предлагаемым методом МПКС для линейной траектории корабля-носителя, которые показали эффективность предложенного алгоритма в условиях, близких к реальным. Приведены также результаты численного моделирования для круговой траектории корабля-носителя. Проведено сравнение с известным адаптивным методом шумопеленгации MUSIC. Более эффективным для подавления корабельных помех оказалось использование метода МПКС. Показано, что при применении некогерентного апертурного синтеза более предпочтительной является криволинейная траектория движения приёмной системы, обеспечивающая лучшую точность локализации источника.

Исследование выполнено при поддержке поддержки Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-38-00739).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иваненков А. С., Коротин П. И., Орлов Д. А. и др. // Гидроакустика. 2011. Вып. 14(2). С. 117.
2. Hayes M. P., Gough P. T. // IEEE J. Ocean. Eng. 2009. V. 34, No. 3. P. 207.

3. Autrey S.W. // IEEE J. Ocean. Eng. 1988. V. 84, No. 2. P. 592.
4. Stergiopoulos S., Sullivan E. J. // J. Acoust. Soc. Am. 1989. V. 86, No. 1. P. 158.
5. Kim S., Youn D. H., Lee C. // IEEE J. Ocean. Eng. 2002. V. 27, No. 2. P. 322.
6. Hou Y., Huang J., Jiang M., Jin Y. // EURASIP J. Advances in Signal Proc. 2010. V. 2010. Art. no. 751069.
7. Иваненков А. С., Коротин П. И., Орлов Д. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 2. С. 166.
8. Stergiopoulos S., Urban H. // IEEE J. Ocean. Eng. 1992. V. 17, No. 1. P. 16.
9. Ivanenkov A., Korotin P., Orlov D., et al. // Proc. Forum Acusticum. 2011. 27 June–1 July 2011, Aalborg, Denmark. P. 2509.
10. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
11. Турчин В. И. Введение в современную теорию оценки параметров сигналов. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. 116 с.
12. Родионов А. А., Турчин В. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 1. С. 60.
13. Banerjee S., Anindya R. Linear algebra and matrix analysis for statistics. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2014. 580 p.
14. Ермолаев В. Т., Флакман А. Г., Сорокин И. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 9. С. 641.
15. Родионов А. А., Семенов В. Ю. // Тр. II Всероссийской акустической конф. 6–9 июня 2017, Нижний Новгород. С. 1041.

Поступила в редакцию 6 декабря 2018 г.; принята в печать 27 февраля 2019 г.

LOCALIZATION OF A MOTIONLESS SOUND SOURCE BY SIMULTANEOUS SUPPRESSION OF INTERFERENCE USING INCOHERENT APERTURE SYNTHESIS

A. A. Rodionov, V. Yu. Semenov, N. V. Savel'yev, and K. S. Konovalov

We consider the problem of direction finding of a motionless sound source by using aperture synthesis. The emitted signal of the source is assumed to be time incoherent. This scenario is most interesting from the practical point of view, since the real sources mainly have a continuous emission spectrum. It was assumed that in addition to sea noise, the receiving system was also affected by onboard interference caused by the mechanisms inside the carrier ship. The power of onboard interference greatly exceeded the power of the useful signal. The results of testing of the proposed algorithms using numerical and lake experiments are presented. It has been shown that, depending on the length and type of trajectory of the carrier ship, different accuracy of the measured coordinates of a motionless source is achieved.