

УДК 534

© Г. С. Малышкин*, 2023

ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 197046, Россия, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30.

*genstepmal@yandex.ru

О ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ШУМОВЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ ТРАЕКТОРИЙ НА ВЫХОДЕ АДАПТИВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Статья поступила в редакцию 21.01.2023, после доработки 06.03.2023, принята в печать 31.05.2023

Аннотация

Для обнаружения и классификации объектов используются траектории источников, выявленные в процессе гидроакустического наблюдения, которые содержат информацию об измеренных параметрах объектов, являющихся их классификационными признаками. Анализ этих признаков позволяет принять решение о классе наблюдаемого объекта, например, надводный или подводный источник. В качестве измеряемых параметров объектов используются их энергетические характеристики, параметры наблюдаемой траектории (пеленг, быстрота изменения пеленга и другие возможные параметры траектории). При этом правильность и быстрота принятого решения о классификации зависит от количества и качества используемых классификационных признаков, которые определяются как параметрами наблюдаемого объекта, так и особенностями распространения звука от источника к средству наблюдения.

Для обнаружения и разрешения сигналов далее рассматриваются быстрые проекционные адаптивные алгоритмы, использование которых применительно к задачам натурного экспериментального обнаружения сигналов рассматривалась в [1], [4]. Целевая задача этого класса алгоритмов является обеспечение высокой вероятности обнаружения и точности измерения параметров траекторий источников в условиях модели многолучевого распространения и рассеяния в реальной океанической среде [5]–[8]. Предлагаемая работа является продолжением работ [1], [4], и ставит своей задачей обеспечить применение экспериментальных натуральных данных не только для обнаружения, но и для классификации наблюдаемых источников.

Предметом исследования являются результаты натурного эксперимента гидроакустического шумопеленгования, приведённые ранее и подробно описанные в [1], [4]. Для эксперимента использовалась антенна из $L = 56$ вертикальных гирлянд (из 10 элементов каждая), эквидистантно разнесённых по горизонтали. Антенна установлена на глубине 200 метров в прибрежной морской зоне берегового клина вблизи судоходных трасс. На элементы плоской антенны воздействовали сигналы надводных судов, неконтролируемо перемещающиеся в зоне наблюдения и один подводный источник.

Для построения адаптивных алгоритмов использовалось сингулярное разложение выборочных данных элементов антенны. Модификация исходных результатов сингулярного разложения позволяет при построении пеленгационных рельефов создать алгоритмы, обеспечивающие приоритетные условия для выделения отдельных компонентов наблюдаемых (например, самых слабых) сигналов.

В связи с этим, дополнительно к неадаптивному пеленгационному рельефу, предлагается формировать три варианта пеленгационного рельефа, каждый из которых решает часть общей задачи выделения и классификации отдельных разновидностей наблюдаемых сигналов:

- исходный, соответствующий энергии сигналов входной выборки с усиленными компонентами наиболее слабых сигналов (обзорный алгоритм);
- пеленгационный рельеф, использующий алгоритм для обнаружения слабых и рассеянных сигналов;
- пеленгационный рельеф, выделяющий когерентные компоненты сигналов.

Проведён анализ траекторий более 30 источников в эпизоде длительностью два часа сорок минут, что позволило увеличить надёжность обнаружения и точность измерения параметров наблюдаемых объектов. Совместный анализ траекторий источников на основе различных вариантов пеленгационного рельефа позволил улучшить условия обнаружения слабых сигналов и принять классификационные решения с использованием классификационного признака о ширине области флуктуаций траектории надводной цели для сигналов с сильной рассеянной компонентой.

Ключевые слова: антенные решётки, сильные и слабые сигналы, когерентные и рассеянные компоненты сигнала, быстрые проекционные адаптивные алгоритмы, варианты пеленгационных рельефов, параметры для классификации источников

Ссылка для цитирования: Малышкин Г.С. О возможности обнаружения и классификации шумовых источников на основе анализа их траекторий на выходе адаптивной пространственной обработки // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 2. С. 126–143. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(2)-9

For citation: *Malyshev G.S. On the Possibility of Detection and Classification of Noise Sources Based on Analysis of their Trajectories at the Output of Adaptive Spatial Processing. Fundamental and Applied Hydrophysics. 2023, 16, 2, 126–143. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(2)-9*

© G. S. Malyshkin*, 2023

State Research Center of the Russian Federation "Concern CSRI Elektropribor", JSC, 30,
Malaya Posadskaya Str., St Petersburg, 197046, Russia

*genstepmal@yandex.ru

ON THE POSSIBILITY OF DETECTION AND CLASSIFICATION OF NOISE SOURCES BASED ON ANALYSIS OF THEIR TRAJECTORIES AT THE OUTPUT OF ADAPTIVE SPATIAL PROCESSING

Received 21.01.2023, Revised 06.03.2023, Accepted 31.05.2023

Abstract

To detect and classify objects, the source trajectories detected in the process of hydroacoustic observation are used, which contain information about the measured parameters of objects, which are their classification attributes. The analysis of these attributes allows to make a decision about the class of the observed object, for example, a surface or underwater source. As the measured object parameters are used their energy characteristics, parameters of the observed trajectory (bearing, speed of change in bearing and other possible trajectory parameters). In this case, the correctness and speed of the decision on classification depends on the quantity and quality of used classification signs, which are determined by both parameters of the observed object, and the features of sound propagation from the source to the observation device.

For signal detection and resolution, we further consider fast projective adaptive algorithms, the use of which, as applied to the problems of in-situ experimental signal detection was considered in [1], [4]. The goal of this class of algorithms is to provide a high probability of detection and accurate measurement of the parameters of the source trajectories under the conditions of a model of multi-beam propagation and scattering in the real ocean environment [5]–[8]. The proposed work is a continuation of the work [1], [4], and aims to ensure the use of experimental field data not only for detection, but also for the classification of the observed sources.

The subject of the study are the results of the full-scale experiment of hydroacoustic noise direction finding, given earlier and described in detail in [1], [4]. For the experiment was used antenna of $L = 56$ vertical daisy chains (of 10 elements each), equidistantly spaced horizontally. The antenna was installed at a depth of 200 meters in the coastal marine zone of the coastal wedge near the shipping lanes. The elements of the flat antenna were affected by signals from surface ships moving uncontrollably in the observation area and one underwater source.

A singular decomposition of sampled antenna element data was used to construct adaptive algorithms. Modification of the initial results of singular decomposition allows to create algorithms that provide priority conditions for extraction of separate components of the observed (e.g., weakest) signals when constructing direction finding terrain.

In this regard, in addition to the non-adaptive direction finding relief, it is proposed to form three variants of direction finding relief, each of which solves part of the general problem of selection and classification of individual varieties of observed signals:

- Initial, corresponding to the energy of the signals of the input sample with amplified components of the weakest signals (overview algorithm);
- direction finding relief, which uses an algorithm to detect weak and scattered signals;
- direction finding terrain, which highlights the coherent components of signals.

Analysis of the trajectories of more than 30 sources in the episode of two hours and forty minutes has been carried out, which increased the reliability of the detection and measurement accuracy of the parameters of the observed objects. Joint analysis of the trajectories of sources based on different variants of the bearing relief allowed to improve the conditions for the detection of weak signals and to make classification decisions using the classification attribute of the width of the area of fluctuations of the surface target trajectory for signals with a strong scattered component.

Keywords: antenna arrays, strong and weak signals, coherent and scattered signal components, fast projection adaptive algorithms, variants of bearing reliefs, parameters for source classification

1. Введение

Целью гидроакустического наблюдения является выявление полного состава наблюдаемых объектов, то есть обнаружение, анализ параметров и структуры сигналов, поступающих от каждого источника, и классификация всех объектов на заданные классы. Последняя операция обеспечивается как результат обобщённого анализа всей совокупности физических, энергетических и поведенческих признаков каждого объекта, выявленного в зоне обзора гидроакустического средства [6]. Особенно сложным является наблюдение за объектами с минимальным уровнем шумоизлучения, поскольку даже вторичных маскирующих эффектов от интенсивных многолучевых, часто рассеянных источников [7–9] достаточно для маскировки присутствующих на входе антенны слабых сигналов. В связи с этим задача обнаружения и построения траекторий наиболее слабых сигналов требует разработки целенаправленных алгоритмов, создающих приоритетные условия для решения этой задачи.

Обеспечение классификации становится возможным, если целенаправленный алгоритм позволяет лучше выделить как известные (отношение сигнал/помеха и пеленг на объект [6]), так и дополнительные

классификационные признаки, основанные на измерении акустической протяжённости (ширины) траекторий источников после ограничения мощности наиболее сильных сигналов [1], и [4], где проведён анализ параметров траекторий многочисленных мешающих сигналов. Прямое измерение «ширины отметки» [11], [12] проблематично в связи с малым отношением сигнал/помеха при шумопеленговании и отсутствием конкретных алгоритмов для таких измерений.

Предлагаемая работа является продолжением работ [4], [5], где были разработаны быстрые проекционные адаптивные алгоритмы, ориентированные на обнаружение и оценку параметров сигналов применительно к модели сигналов в условиях многолучевого распространения с рассеянием. Эти алгоритмы используют «короткие» выборки, реализуют ограничение мощности присутствующих сильных сигналов, выделяют сигналы методом двустороннего пространственного контраста и проводят точное измерение угловых координат источников с использованием интерполяции отметок сигналов статического веера характеристик направленности [1], [4], [5], [10]. Опираясь на эти методы последующие исследования [13] позволили провести количественный анализ результатов натурного экспериментального измерения ширины траекторий различных видов надводных и подводных источников применительно к натурным морским условиям берегового клина. В работе [14] проведено подробное количественное исследование большого количества траекторий надводных и одного подводного источника и определены пороговые уровни ширины траектории, разделяющие подводные и надводные источники в условиях рассматриваемого эксперимента, равные ориентировочно 0.5 градуса.

Целью представляемой работы является включение разработанных алгоритмов в общую систему гидроакустического наблюдения начиная с улучшения условий первичного обнаружения и разрешения оператором всех сигналов и использования для классификации дополнительного физического признака, основанного на анализе ширины траектории источников. Используемые в настоящее время классификационные признаки (пеленг на объект и энергетические характеристики сигналов) требуют также построения качественных траекторий наблюдаемых объектов, анализ которых на длительном интервале наблюдения позволяет выявить особенности и классификационные поведенческие характеристики.

Такой подход требует не просто использование одного неадаптивного алгоритма, а группы целенаправленно ориентированных алгоритмов, как для первичного обнаружения, так и для измерения и анализа дополнительного классификационного признака, связанного с особенностями распространения и измерения параметров сигналов надводных и подводных источников. В результате выполнения представляемой работы, в рамках натурного эксперимента применительно к морским условиям прибрежного клина, построено семейство траекторий многочисленных источников, позволяющих обнаружить и классифицировать один глубоководный источник в присутствии многочисленных надводных источников.

2. Особенности организации вычислительного процесса и используемых алгоритмов

В предыдущих работах [1], [4], [5] рассмотрены основные классические и быстрые проекционные алгоритмы, используемые для построения пеленгационных рельефов. Параметры этих алгоритмов здесь далее конкретизируются. Для решения задачи построения и анализа вариантов траекторий, позволяющих выявить конкретные физические особенности принятых сигналов, используемых как классификационные признаки для разделения надводных и подводных источников. В данной работе анализ натурных данных проводится с помощью быстрых проекционных алгоритмов, параметры которых уточняются применительно к конкретным экспериментам.

Напомним основные параметры натурного эксперимента, приведённого в [4]. Для эксперимента использовалась плоская антенна из $L = 56$ вертикальных гирлянд (из 10 вертикально разнесённых элементов каждая), эквидистантно разнесённых по горизонтали. Антенна установлена на глубине 200 м в прибрежной морской зоне берегового клина вблизи судоходных трасс, в районе интенсивной хозяйственной деятельности, в зоне наблюдения находились десятки источников. На элементы антенны воздействовали сигналы надводных судов, неконтролируемо перемещающиеся в зоне наблюдения. Один подводный источник контролируемо перемещался в зоне наблюдения. Его траектория показана тонкой красной линией на всех анализируемых траекториях, представленных на рисунках.

Элементы гирлянд имеют кардиоидную характеристику направленности, максимум которой обращён в сторону открытого моря. Сигналы $L = 56$ таких гирлянд антенной системы подвергались цифровой регистрации (консервации) с частотой дискретизации, достаточной для точного воспроизведения сигналов на частотах ниже проектной частоты антенны (при которой горизонтальное межэлементное расстояние равно половине длины волны).

Обработка записей выполнялась в два этапа. На первом этапе производился спектральный анализ сигналов каждой гирлянды с периодом $T_{ca} = 2c$. При обработке формировался частотный диапазон со средней частотой 0,6758 (от проектной частоты антенны). Общая протяжённость анализируемого эпизода (длительностью два часа сорок минут) состояла из 4618 интервалов спектрального анализа. Волновой размер антенны на средней частоте диапазона равен 18,92. В результате вычисления спектральных отсчётов на каждом интервале спектрального анализа (СА) формируется 1173 векторов столбцов $X(n, t)$ размерности $L = 56$ по числу элементов антенны (гирлянд), где n определяет номер спектрального отсчёта, а t дискретный номер интервала спектрального анализа по времени.

На втором этапе из полученных спектральных отсчётов формировался адаптивный (или неадаптивный) веер каналов обзора из $J = 151$ характеристик направленности $j = \overline{1, J}$ и формировались и обрабатывались пеленгационные рельефы, характеризующие сигнальную обстановку в зоне обзора. Частотный диапазон разбивался на $R = \frac{N}{K} = 51$ ($r = \overline{1, R}$) адаптивных поддиапазонов, где $N = 1173$ — общее число используемых далее спектральных отсчётов, а K — число спектральных отсчётов, используемых в одном частотном поддиапазоне при реализации адаптивных алгоритмов. Размерность векторов, используемых для дальнейшей адаптивной обработки, равна 46 ($K_0 = KT_0 = 23 \cdot 2$) из $K = 23$ отсчётов по частоте на двух последовательных по времени интервалах СА, $T_0 = 2$. Построение пеленгационного рельефа проводилось для 2309 моментов наблюдения с временным интервалом регистрации данных 4с, равным двум интервалам СА. Вычисление частных пеленгационных рельефов проводилось для каждой адаптивной группы с последующим суммированием в общем пеленгационном рельефе для каждого из $J = 151$ пространственных каналов. Решение об обнаружении сигналов и оценке текущих значений параметров обнаруженных сигналов принималось в результате обработки общего пеленгационного рельефа программой, реализующей методы двустороннего пространственного контраста, подробно описанные в [1], [4]. Сущность методов двустороннего контраста заключается в формировании скользящего окна из сигналов (например, семи) пространственных каналов, по два крайних сигнала с двух сторон формируют оценки уровней помехи, которые используются для прогноза уровня помехи на сигнальную часть окна, состоящую из трёх средних элементов. При попадании отметок сигнала в сигнальное окно фиксируется разница между уровнем сигналов в сигнальной части окна и прогнозным уровнем помехи в этих каналах и при превышении порога фиксируется обнаружение сигнала и вычисляется максимум сигнала, а измеренные уровни превышения трёх сигналов в сигнальном окне используются для уточнения пеленга на источник [1].

Дополнительная обработка пеленгационных рельефов проводилась при усреднении скользящим окном $T_a = 8$ последовательных пеленгационных рельефов, что позволяло увеличивать общее время накопления при построении пеленгационного рельефа до 32 с.

Адаптивная обработка информации антенны заключалась в создании алгоритмов, создающих благоприятные условия для обнаружения наиболее слабых сигналов и классификации всех сигналов, присутствующих в зоне наблюдения гидроакустического средства. Сущность предлагаемых методов обработки базируется на использовании сингулярного разложения элементов входной выборки для разделения сигналов, отличающихся друг от друга по интенсивности и создании приоритетов для выделения наиболее слабых и трудно измеряемых компонентов входной смеси.

Сингулярное разложение адаптивной входной выборки $X(r, \tau)$ размерности $L \times K_0$ (где L — число элементов антенны, K_0 — число элементов выборки по времени и по частоте, $K_0 < L$, в соответствии с особенностями быстрых проекционных алгоритмов) при объёме выборки K_0 меньше, чем число элементов антенны L представлялось в виде

$$X(r, \tau) = U(r, \tau) \Theta(r, \tau) Y^*(r, \tau) = \sum_{p=1}^{K_0} \sigma_p(r, \tau) U_p(r, \tau) Y_p^*(r, \tau), \quad (1)$$

$$\text{где } U(r, \tau) = [U_1(r, \tau) \dots U_p(r, \tau) \dots U_{K_0}(r, \tau)], \quad (2)$$

$$Y(r, \tau) = [Y_1(r, \tau) \dots Y_p(r, \tau) \dots Y_{K_0}(r, \tau)] \quad (3)$$

матрицы размерности $L \times K_0$ и $K_0 \times K_0$ левых и правых сингулярных векторов, соответственно;

$$\Theta(r, \tau) = \begin{bmatrix} \sigma_1(r, \tau) & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_{K_0}(r, \tau) \end{bmatrix} \quad (4)$$

диагональная матрица размерности $K_0 \times K_0$ сингулярных чисел матрицы $X(r, \tau)$.

Напомним, что собственные числа, элементы диагональной $\Theta(r, \tau)$ матрицы, описывают (по убыванию) энергетические характеристики, а собственные векторы фазовую структуру сигналов, содержащихся во входной выборке и, следовательно, содержат информацию о направлении на наблюдаемые объекты. Управление алгоритмами происходит с помощью изменения весовых коэффициентов, заменяющих старшие собственные числа, что эквивалентно ограничению мощности наиболее сильных мешающих сигналов.

Вычисление адаптивного пеленгационного рельефа производится с использованием соотношения

$$C_{jcor}^{\Sigma} = \frac{1}{T_a} \sum_{\tau=1}^{T_a} \left[\frac{1}{R} \sum_{r=1}^R V_j^*(r) U(r, \tau) \Theta^2(r, \tau) \Delta(r, \tau) U^*(r, \tau) V_j(r) \right], \quad (5)$$

где с помощью опорных векторов $V_j(r)$ $j = \overline{1, J}$ формируется $J = 151$ адаптивных пространственных каналов, сигналы которых накапливаются по совокупности частотных групп $r = \overline{1, R}$ и времени $\tau = \overline{1, T_a}$. Конкретные параметры алгоритма определяются диагональной матрицей $\Delta(r, \tau)$, с помощью которой корректируются исходные неадаптивные данные входной выборки $\Theta^2(r, \tau)$.

При этом информация о направлении на все объекты сохраняется, так как при этом используются исходные собственные векторы ослабляемых сигналов, но малозумные объекты получают более благоприятные условия для функционирования.

Дальнейшая обработка заключалась в использовании трёх вариантов весовых коэффициентов при построении пеленгационных рельефов, обеспечивающих преимущественное выделение различных компонентов сингулярного разложения:

- исходный, соответствующий энергии сигналов входной выборки $\Theta(r, \tau)$ (неадаптивный алгоритм);
- выделяющий когерентные компоненты сигналов (одинаковые весовые коэффициенты);
- выделяющий слабые и рассеянные сигналы (ограничена мощность сильных сигналов).

Основная особенность предлагаемого набора пеленгационных рельефов заключается в расширении не только возможностей обнаружения наиболее слабых сигналов, но и в появлении возможностей выделять рассеянные компоненты сигналов, несмотря на наличие в них сильных когерентных компонент.

Рассмотрим структуру собственных чисел и варианты их коррекции применительно к рассматриваемому натурному эпизоду [4], с другими параметрами алгоритмов. На рис. 1 кривой 1, в качестве примера, представлено исходное распределение собственных чисел (ось абсцисс — номер собственного числа, ось ординат — уровень соответствующего собственного числа, в логарифмических единицах, дБ) на 118 м интервале спектрального анализа, что соответствует 59-му по времени пеленгационному рельефу $\tau = 59$. Этот результат усреднён по $R = 51$ частотным группам из 46 выборок, составленных из 23 спектральных отсчётов на двух временных интервалах спектрального анализа. Общий пеленгационный рельеф формировался после дополнительного усреднения по времени ($T_a = 8$) восьми частных пеленгационных рельефов, итоговый объём выборок (из вектор-столбцов размерности $L = 56$) был равен $46 \cdot 51 \cdot 8 = 18868$.

Вариант использования весовых коэффициентов, заданных кривой 1, формирует исходный неадаптивный пеленгационный рельеф, который определяется свойствами исходной некорректированной входной выборки, полученной в натурном эксперименте. Уровень собственных чисел (характеризующих энергию присутствующих сигналов) изменяется от 35 дБ до –3 дБ, при этом старшие собственные числа характеризуют наиболее сильные сигналы, затем следуют сигналы с меньшей энергией и последние номера определяют энергию помехового фона в области, где отсутствуют сигналы локальных источников. Собственные числа состоят из суммы компонент, порождённых как локальными источниками, так и сигналами распределённой помехи, при этом компоненты распределённой помехи формируют фон, на котором локальные отметки сигналов выделяются с помощью метода двустороннего пространственного контраста. Использование исходных некорректированных собственных чисел в качестве весовых коэффициентов при построении пеленгационного рельефа позволяет правильно выявлять взаимную энергетическую величину каждого сигнала, однако разрешение средних, и слабых (в особенности самых слабых) сигналов затрудняется ввиду наличия мощных доминирующих отметок наиболее сильных сигналов, маскирующих слабые сигналы.

Кривые 2 и 3 характеризуют весовые коэффициенты, используемые при построении адаптивных вариантов пеленгационного рельефа, обеспечивающих улучшение разрешения и измерения параметров более слабых сигналов.

Кривая 2 характеризует состав собственных чисел после ограничения мощности 25 старших собственных чисел, что ослабляет доминирование наиболее сильных компонент в пеленгационном рельефе, а последние собственные числа также уменьшаются для снижения уровня помехового фона в области отсутствия отметок

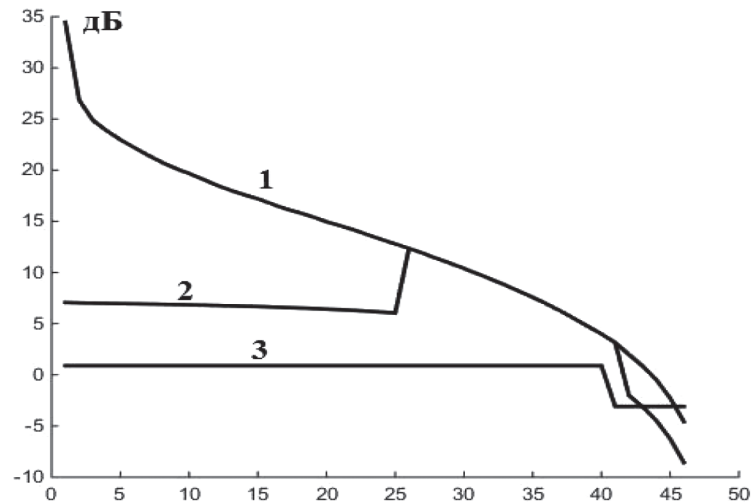


Рис. 1. Распределение весовых коэффициентов для трёх вариантов алгоритмов: 1 — неадаптивный алгоритм; 2 — алгоритм для выделения слабых и рассеянных сигналов; 3 — весовые коэффициенты когерентных сигналов

Fig. 1. The distribution of weight coefficients for three variants algorithms: 1 — nonadaptive algorithm (initial eigenvalues); 2 — algorithm for weak and scattering signals; 3 — weight coefficients for coherent signals

локальных сигналов. Основная задача при формировании весовых коэффициентов в этом случае — максимально усилить в пеленгационном рельефе отметки наиболее слабых сигналов, при этом в рассматриваемой ситуации номера с двадцать шестого по сорок первый наиболее вероятны для их появления.

Изменяя уровень, до которого опускаются собственные числа наиболее сильных сигналов, можно регулировать откорректированный уровень этих сигналов в пеленгационном рельефе, а, следовательно, и степень ослабления их маскирующего действия на слабые сигналы. В результате формируется кривая 2, характеризующая алгоритм, обеспечивающий выделение слабых сигналов и максимальное ослабление сильных сигналов. Чрезмерно глубокое подавление сильных сигналов приводит к появлению провалов в пеленгационном рельефе, не позволяющих использовать методы пространственного контраста при обнаружении слабых сигналов.

Кривая 2 формируется вычитанием из суммарной кривой 1 корректируемой части когерентных компонент наиболее сильных сигналов. Это означает ослабление главных когерентных компонент сильных сигналов и усиление роли более слабых рассеянных компонент этих сигналов в соответствующем пеленгационном рельефе. Этот вариант обеспечивает в пеленгационном рельефе минимальный уровень наиболее сильных когерентных компонент сигналов и полное использование наиболее слабых и рассеянных компонент. Кривая 3 характеризует распределение весовых коэффициентов равных единице с ослаблением самых малых собственных чисел. Этот вариант означает частичное ослабление сильных и доминирующих сигналов. При таких весовых коэффициентах сигналы пеленгационного рельефа формируются главным образом их когерентными компонентами, величины отметок сигналов становятся ближе друг к другу, ослабляется доминирование сильных, улучшается взаимное разрешение сильных и средних сигналов. Слабым местом этого алгоритма является увеличение веса малых собственных чисел, порождённых помеховыми компонентами выборки.

Оценка эффективности и сравнение приведённых выше алгоритмов будет проводиться далее по результатам обнаружения и анализа траекторий натуральных источников на значительном интервале наблюдения. Однако вначале рассмотрим набор пеленгационных рельефов, с помощью которых будем анализировать конкретный эпизод, рассмотренный ранее в [1], [4].

Пеленгационные рельефы, получены на 59 такте (из 2309 тактов эпизода наблюдения) при использовании вариантов весовых коэффициентов, приведённых на рис. 1. По оси абсцисс представлен синус направления наблюдения относительно перпендикуляра к рабочей поверхности антенны. Отметим одинаковую разрешающую способность по угловой координате (в зависимости от синуса пеленга), что обусловлено,

как нелинейным характером синуса, так и ухудшением разрешающей способности плоской антенны при отклонении от перпендикуляра к рабочей плоскости антенны, так что оба эффекта компенсируют друг друга. Измерение угловой ширины траектории источника с границами α_1 и α_2 проводится с помощью соотношения

$$\alpha_1 - \alpha_2 = 57,3 * \frac{\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2}{\cos (\alpha_1 + \alpha_2)}, \quad (6)$$

где слева угловая разница определена в градусах.

На рисунке 2 представлены примеры четырёх пеленгационных рельефов:

- неадаптивный алгоритм Бартлетта, рис. 2, *а* (данные кривой 1, матрица $\Delta(r, \tau)$ единичная);
- алгоритм рис. 2, *б* получен суммированием пеленгационных рельефов рис. 2, *а* и *г*;
- алгоритм рис. 2, *в* с весовыми коэффициентами когерентных сигналов (данные кривой 3);
- алгоритм рис. 2, *г* для выделения наиболее слабых и рассеянных сигналов (кривая 2).

Точки пеленгационного рельефа, в которых с помощью алгоритмов двустороннего пространственного контраста зафиксировано обнаружение сигнала, отмечены красным значком, синяя точка ниже характеризует оценку конкретного уровня помехи, зафиксированного с помощью окна из 5 сигналов пространственных каналов, использованных для обнаружения каждого сигнала при реализации двустороннего пространственного контраста. При обнаружении слабых сигналов разница между уровнем сигнала и оценкой помехи характеризует отношение сигнал/помеха на выходе антенны для данного источника. Для сильных сигналов эта оценка занижена, (так как ширина интенсивной отметки шире используемого окна) и отношение сигнал/помеха должно оцениваться по отношению уровня сигнала к уровню распределённой помехи. Последний определяется минимальным уровнем пеленгационного рельефа в направлениях, где отсутствуют локальные источники. Точки над осью абсцисс фиксируют факт обнаружения сигналов и пеленг на обнаруженный объект, уровень этих точек характеризует уровень распределённого помехового фона.

На рис. 2, *а* исходный неадаптивный пеленгационный рельеф имеет высокую пороговую чувствительность, он предназначен для обнаружения всех сигналов (в том числе самых слабых). Величина непересекающихся отметок сигнала (случай пересекающихся отметок рассматривался в [4] и [10]) соответствует их фактической энергии, присутствуют доминирующие сигналы, превышающие уровень фона на уровень до 11 дБ, но необходимо обнаружить слабые сигналы, отметки которых составляют до одного процента (–20 дБ) и ниже помехового фона. Этот пеленгационный рельеф не создаёт приоритетных условий для обнаружения наиболее слабых сигналов. Действительно, для успешного обнаружения слабых сигналов необходимо обнаруживать отметки слабых сигналов, составляющие менее одной тысячной части динамического диапазона (т.е. –31 дБ) этого пеленгационного рельефа. Слабым местом этого пеленгационного рельефа является то, что малые случайные вариации уровня нестационарного бокового поля сильных сигналов оказываются соизмеримыми с контрастным порогом чувствительности для обнаружения слабых сигналов. В результате высокочувствительные алгоритмы, основанные на методах двустороннего пространственного контраста [1, 4], либо не надёжно обнаруживают слабые сигналы, либо формируют ложные отметки. На пеленгационном рельефе, (красные точки на рис. 2, *а* и далее), обнаружено 18 сигналов, но дальнейший анализ в рамках анализа траекторий источников выявляет, как пропуски, так и ложные обнаружения этого варианта алгоритма. В частности, на рис. 2, *а*) пропущен сигнал подводного источника (при пеленге синуса, равного –0,09), который обнаруживается во всех остальных вариантах пеленгационных рельефов на рис. 2.

На рис. 2, *в* представлен пример пеленгационного рельефа, с коэффициентами, представленными кривой 3 рис. 1. Данный вариант адаптивного алгоритма обеспечивает надёжное обнаружение и разрешение всех основных когерентных сильных и средних сигналов, присутствующих на входе антенны. Отметим, что пеленгационный рельеф этого варианта формирует сигналы, уровни которых различаются не более чем на 1,4 дБ.

В сигналах четко сформированы максимумы, и обнаружение слабых сигналов реализуется при величине отметки, равной около трёх процентов от динамического диапазона этого варианта пеленгационного рельефа. С помощью этого варианта пеленгационного рельефа обнаружено 19 сигналов. Этот вариант обеспечивает лучшее разрешение сильных и средних сигналов между собой.

Вариант пеленгационного рельефа (представленного на рис. 2, *г*) ориентирован на обнаружение наиболее слабых и рассеянных сигналов. Это обеспечивается ослаблением наиболее сильных когерентных сигналов (ослаблены старшие собственные числа с номерами с 1 по 25) и полноценным использованием младших собственных чисел, сформированных самыми слабыми и рассеянными сигналами (номера с 26 по 41) и ослабленным помеховым фоном (номера собственных чисел от 42 до 46). Динамический диапазон сигналов этого пеленгационного рельефа уменьшается от –0,4 до 0,5 дБ, т. е., от 0,92 до 1,12

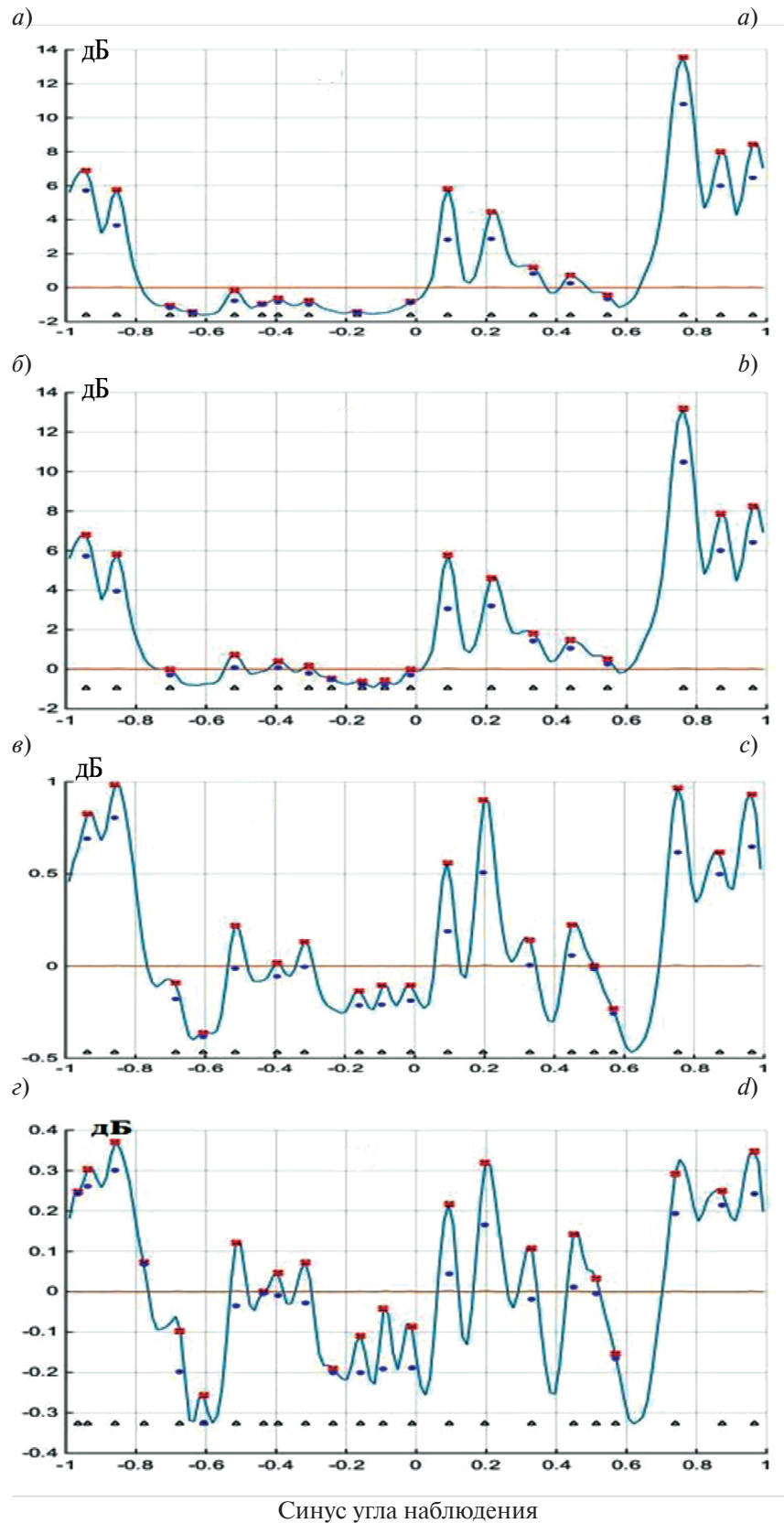


Рис. 2. Пеленгационные рельефы алгоритмов: *а* — неадаптивный алгоритм; *б* — усилены слабые сигналы; *в* — весовые коэффициенты когерентных сигналов; *г* — выделение слабых и рассеянных сигналов

Fig. 2. The direction-finding reliefs algorithms: *a* — nonadaptive algorithm; *b* — strengthening of weak signals; *c* — weight coefficients (equally) for coherent signals; *d* — algorithm for weak and scattering signals

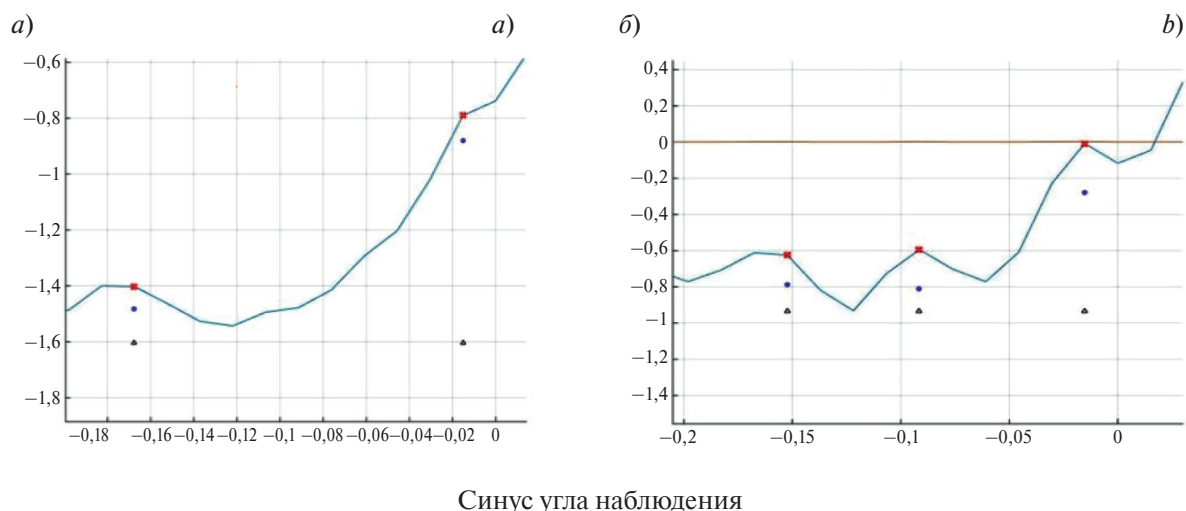


Рис. 3. Фрагменты пеленгационных рельефов: *a* — неадаптивный; *б* — усилены слабые сигналы

Fig. 3. Fragments of the direction-finding reliefs: *a* — nonadaptive; *b* — strengthening of weak signals

(для логарифмического уровня 0 дБ соответствует единице исходного сигнала). Данный алгоритм сохраняет взаимное соотношение между сигналами разной интенсивности, то есть сигналы большей интенсивности остаются больше сигналов меньшей амплитуды, хотя относительное превышение сильных сигналов по отношению к слабым значительно уменьшается. Этот вариант алгоритма обеспечил обнаружение 23 сигналов (как это будет видно далее), он выделяет максимальное количество элементов траектории подводного источника. В соответствии с [13], классификационным признаком надводного источника является ширина флюктуаций траектории (измеренной этим вариантом алгоритма) более 0,5 градуса, что будет подтверждено в разделе, где анализируются траектории источников.

Пеленгационный рельеф рис. 2, *б* сформирован суммированием пеленгационных рельефов рис. 2, *a* и рис. 2, *г*, после чего анализировался алгоритмом пространственного контраста. Это можно трактовать как исходный неадаптивный пеленгационный рельеф, в котором усилены компоненты наиболее слабых сигналов. Это приводит к улучшению контрастности их отметок при малом изменении общей конфигурации пеленгационного рельефа. Это видно из сравнения фрагментов рис. 2, *a* и *б*, в области слабых сигналов при значении синусов пеленгов от $-0,2$ до 0 , приведённых на рис. 3.

Как видно из рис. 3, *a* неадаптивный пеленгационный рельеф обеспечил обнаружение двух сигналов, а отметка в окрестности $-0,1$ (для этой реализации выборки) мала и не достигла порога обнаружения. Этим вариантом алгоритма зарегистрирован пропуск сигнала подводного источника. Вариант фрагмента пеленгационного рельефа рис. 2, *б*, представленный на рис. 3, *б* показывает надёжное обнаружение трёх сигналов, в том числе подводного источника при пеленге $-0,09$. Этот источник обнаруживается и двумя адаптивными алгоритмами, реализованными с помощью пеленгационных рельефов, представленных на рис. 2, *в* и *г*.

В дальнейшем вариант пеленгационного рельефа рис. 2, *б* будем характеризовать как исходный с усиленным формированием слабых сигналов. Этот вариант обеспечивает правильное измерение энергетических параметров сигналов по отношению к уровню распределённого фона, что видно из сравнения почти тождественных рельефов на рисунках рис. 2, *a* и рис. 2, *б*. При этом отношение сигнал/локальная помеха для слабых сигналов, измеряется в благоприятных условиях, что при построении траекторий проявляется в увеличении процента выделенных элементов и увеличении точности измерения их параметров.

3. Построение и анализ траекторий наблюдаемых источников

Дальнейшая иллюстрация траекторий наблюдаемых источников основана на использовании записей натуральных сигналов, описанных в [4], где рассматривалось (с несколько отличающимися исходными данными алгоритмов) только обнаружение слабых сигналов. Здесь особое внимание уделяется не просто фиксация отметок, но анализу структуры наблюдаемых траекторий с позиций сохранения их классификационных признаков, формирующихся при распространении звука в реальных морских условиях.

Основная особенность принимаемых сигналов обусловлена расположением антенны в береговом клине, в результате чего характер распространяющихся сигналов определялся как профилем скорости звука, так и наличием наклонного дна. Профиль скорости звука при проведении записей характеризовался условиями поздней осени (рисунок 1 работы [4]). Особенность распространения для этого времени и места состоит в наличии берегового клина и то, что скорость звука в приповерхностном слое превышала скорость звука на оси подводного звукового канала (120 м) и на дне на глубине расположения антенны 200 м.

Характеристика направленности антенны в вертикальной плоскости в рассматриваемой полосе частот развёрнута вверх на 5 градусов относительно горизонтальной плоскости. Основной лепесток характеристики направленности по уровню 0,7, шириной 16 градусов перекрывает угловой диапазон от -3 до $+13$ градусов.

Общие черты профиля дна заключаются в наличии ровного плато в окрестности антенны, далее крутого склона и затем глубоководной части открытого моря. На рисунках 3 работы [4] приведены лучевые картины и профиль дна, их анализ показал, что лучи с углами скольжения от -3 до $+4$ градусов не выходят к поверхности и распространяются в глубинных слоях, что обеспечивает зону обнаружения глубоководных источников. От приповерхностных источников на дистанциях до 3 км обеспечивается проникновение на приёмную антенну, прямых лучей без отражений от поверхности и других участков дна, что обеспечивает сохранение когерентной структуры таких сигналов.

Несмотря на возможные вариации профиля дна для различных направлений наблюдения, и различие конкретных траекторий проникновения звука к антенне, общая характеристика рассматриваемых гидроакустических условий определена тем, что скорость звука у поверхности больше скорости звука на оси канала и на глубине антенны. В таком случае, дальнейшее распространение сигнала приповерхностного источника становится возможным только после многократного отражения от поверхности и различных участков грунта. Причинами неустойчивой, флюктуирующей картины обнаружения и пеленгования дальних приповерхностных источников являются нарушения когерентной структуры сигналов, при отражении от поверхности и дна. Этот же фактор оказывает влияние на нестационарный характер появления и исчезновения участков траектории сигналов в процессе перемещения их источников.

Основная задача заключается в проверке надёжного обнаружения и классификации подводного источника в присутствии многочисленных надводных источников. Каждый вариант рис. 4 и 5 представляет траектории, выделенные при обработке 2309 пеленгационных рельефов с интервалом 4с (ось ординат) в диапазоне углов обзора, синус которых изменяется от -1 до $+1$ (ось абсцисс). На рис. 4 представлены картины траекторий сигналов в эпизоде длительностью 2 ч 40 мин, полученные рассматриваемыми вариантами алгоритмов при времени накопления 32 с, а на рис. 5 представлены фрагменты этих траекторий в области присутствия подводного источника. Траектория подводного источника показана тонкой красной линией.

Рисунки 4, а и 5, а построены с использованием неадаптивного алгоритма. При анализе траекторий, построенных с помощью этого алгоритма, основная сложность объясняется большим динамическим диапазоном входных воздействий от наиболее сильных источников. В результате малые вариации уровня сильных сигналов достигают порога срабатывания слабых сигналов, что затемняет фон, на котором наблюдаются отметки слабых сигналов. Согласно рис. 4, а траектория этого источника замаскирована многочисленными ложными отметками, прямые участки траектории искажены изгибами. В поле наблюдения большие области (в левой нижней части, в центральной части рисунка слева от траектории подводного источника, справа от траектории источника) в которых затруднительно выделение любых сигналов.

Рисунки 4, б и 5, б построены с использованием пеленгационных рельефов, в которых усилены слабые сигналы. Пример такого пеленгационного рельефа приведён на рисунке 2б. В результате существенно улучшилось формирование траекторий слабых сигналов, уменьшилось число случайных срабатываний в промежутках между трассами сигналов, уменьшились флюктуации траектории подводного источника в областях вне пересечения его траекторий с сильными сигналами. В областях пересечения траекторий подводного источника с сильными сигналами наблюдаются существенные смещения траектории слабого сигнала вследствие высокого уровня отметок пересекаемых сильных сигналов. Этот вариант пеленгационного рельефа обеспечивает наиболее достоверную оценку энергетических параметров всех сигналов как сильных, так и слабых при увеличении числа обнаруженных элементов траекторий.

На рисунках 4, в и 5, в представлены траектории источников, сформированные алгоритмом для обнаружения слабых и рассеянных сигналов. Этот вариант пеленгационного рельефа выявляет наибольшее число элементов трассы подводного источника и позволяет оценить ширину его траектории.

Следует отметить, что неточное измерение ширины траектории возможно в зоне неуверенного обнаружения и измерения параметров при очень малых отношениях сигнал/помеха менее 0,005 (-23 дБ). При наличии пропусков в траектории или приращении сигнала над фоном менее 0,5 % (0,022 дБ) эти участки

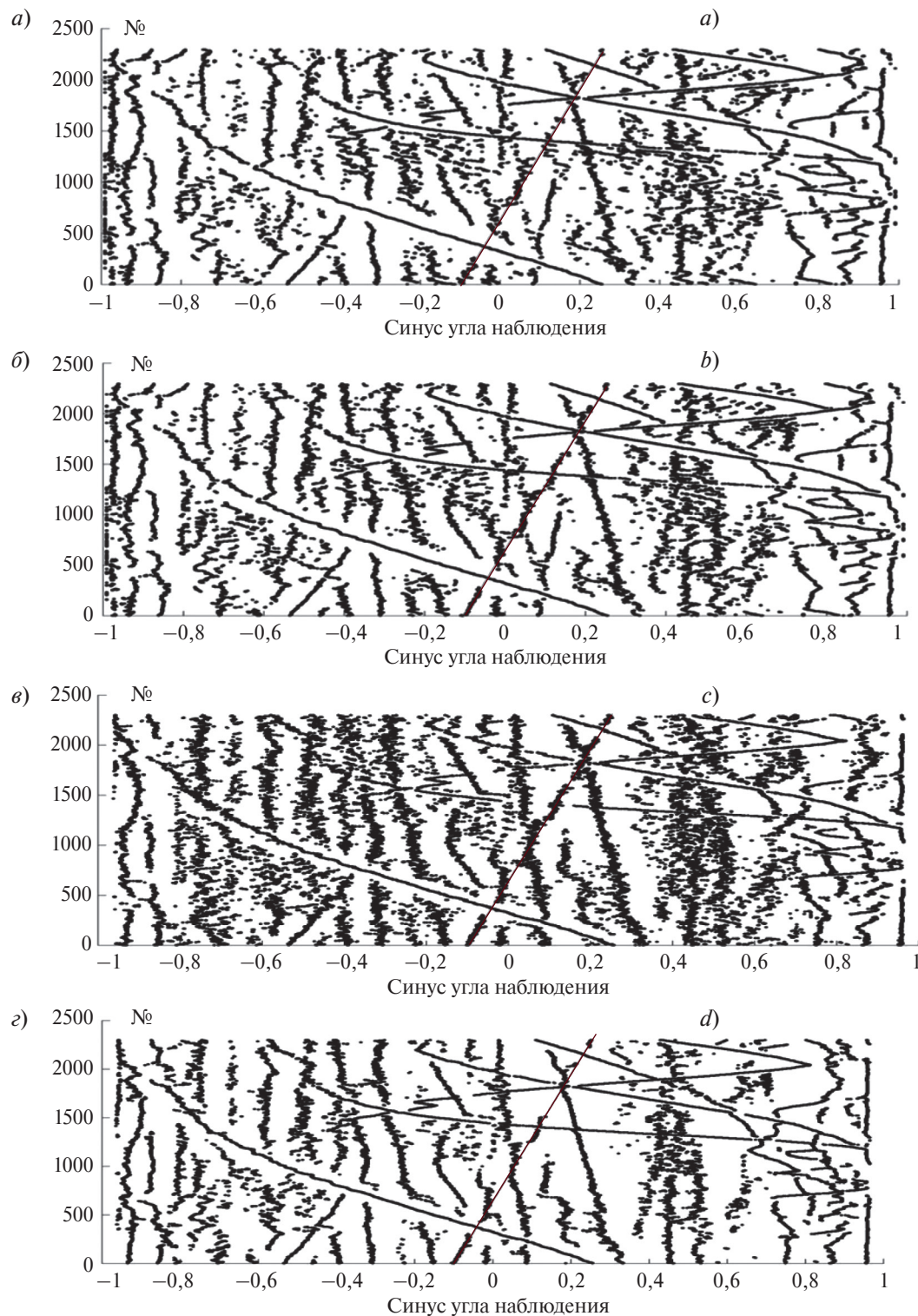


Рис. 4. Траектории сигналов: *a* — неадаптивный алгоритм; *б* — алгоритм с усиленным формированием слабых сигналов; *в* — алгоритм выделяющий слабые и рассеянные сигналы; *г* — алгоритм, выделяющий когерентные сигналы

Fig. 4. Trajectories of signals: *a* — nonadaptive algorithm; *b* — strengthening of weak signals; *c* — algorithm for weak and scattering signals; *d* — weight coefficients (equally) for coherent signals

должны исключаться из состава тестируемого участка при проверке ширины траектории. Надёжность использования результатов этого алгоритма для оценки ширины траектории слабого источника обеспечивается при обнаружении этого сигнала в тестируемом участке когерентным алгоритмом.

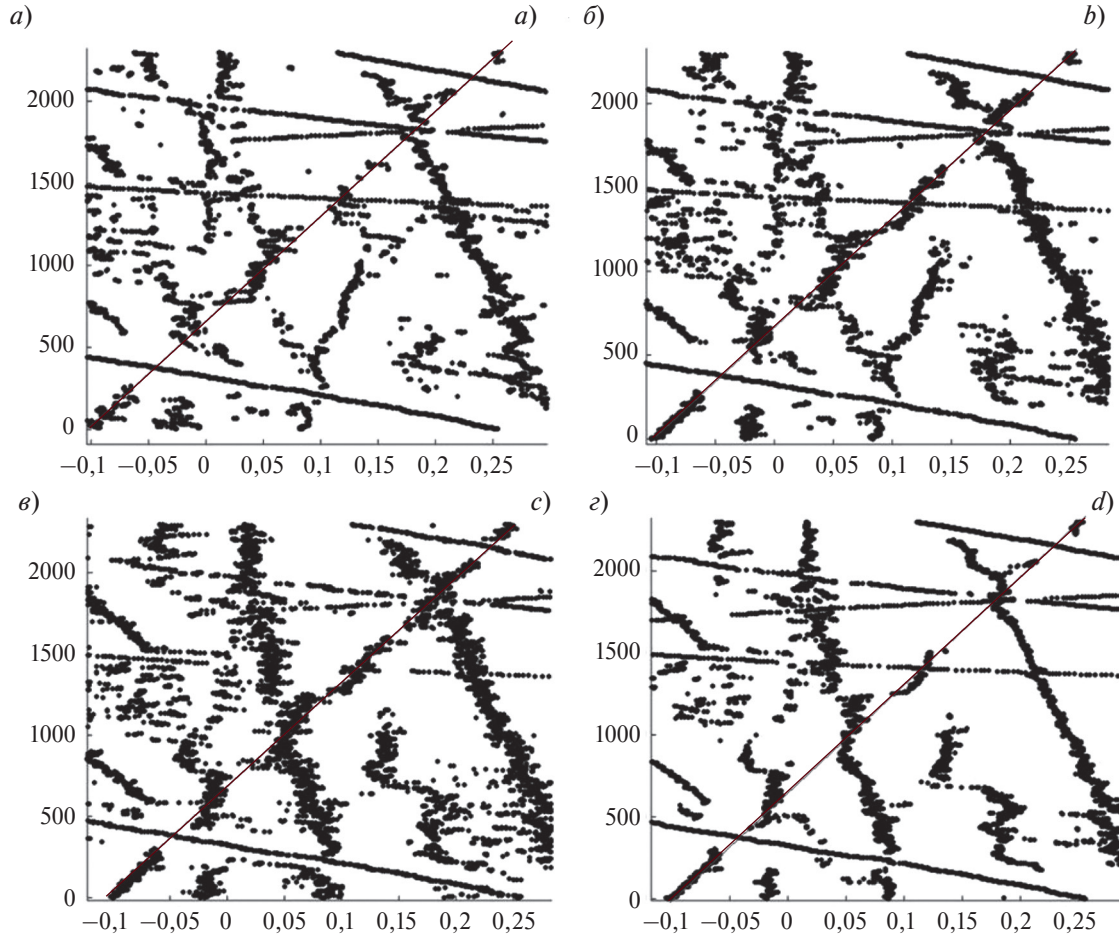


Рис. 5. Траектории подводного источника: *a* — неадаптивный алгоритм; *b* — адаптивный алгоритм с усилением слабых сигналов; *c* — алгоритм, выделяющий слабые и рассеянные сигналы; *d* — алгоритм, выделяющий когерентные сигналы

Fig. 5. Trajectories of underwater source: *a* — nonadaptive algorithm; *b* — strengthening of weak signals; *c* — algorithm for weak and scattering signals; *d* — algorithm that selects coherent signals

Рисунок 4, *z* и 5, *z* представляет траектории, выделенные с помощью алгоритма для выделения когерентных сигналов. Этот алгоритм выделяет меньше элементов траектории подводного источника, что обусловлено частичным подавлением сильных сигналов и увеличением уровня распределённых помех в связи с ростом веса самых малых собственных чисел порождённых распределённым фоном. Для сигналов, содержащих как когерентную, так и рассеянную компоненту ширина траектории оказывается заниженной, и правильно измеряется только для сильно рассеянных сигналов с незначительной когерентной компонентой.

Прежде чем перейти к детальному анализу количественных параметров наблюдаемых траекторий, рассмотрим особенности формирования элементов траекторий источников близких по угловой координате, подробно рассмотренные в,] и в пятом приложении [10]. Мерой близости двух источников по угловой координате является

$$|R(V_1, V_2)|^2 = \left| \frac{V_1 * V_2}{L} \right|^2, \quad (7)$$

где V_1 и V_2 — вектора направления первого (большого) и второго сигналов, а L — количество элементов антенны.

Соотношение (7) определяет уровень квадрата нормированной характеристики направленности антенны, ориентированной максимумом на первый источник в направлении на второй источник. Два источника не влияют друг на друга, если эта величина (уровень нормированной взаимной характеристики направленности) равна нулю (вектора направления V_1 и V_2 ортогональны) или практически влияют слабо, если её величина мала, например, пять процентов. Это означает, что источники находятся на угловом расстоянии, больше полураствора характеристики направленности по первым нулям. Эта величина определяется

волновым размером антенны Ld (d – межэлементное волновое расстояние) и, применительно к рассматриваемому эксперименту, на средней частоте используемого диапазона равна $\frac{1}{Ld} \sim 0,053$ радиана (3,03 градуса) в направлении перпендикуляра к плоскости антенны. Угловое различие пеленга от нуля до величины 0,0265 определяет сравнительно слабое взаимное влияние источников, при этом взаимная характеристика (7) достигает величины $\sim 0,5$. При меньшем различии пеленгов уровень параметра (7) может достигать величины до единицы, что означает зону сильного взаимного влияния сигналов. Если этот параметр в два раза меньше полураствора, то более сильный из двух сигналов отнимает у более слабого половину энергии и присоединяет её себе. При ещё меньших угловых различиях у слабого сигнала отнимается ещё больше энергии и возникают ошибки смещения, как у сильного, так и у слабого сигнала [10]. В этом случае слабый сигнал может не достигать порога обнаружения, а при примерном равенстве их интенсивностей формируется одна общая траектория двух источников, пеленг перемещается в направление между сигналами и может стать неустойчивым, т. е. совершать колебательные перемещения между направлениями на эти источники. Кроме того, при выходе из зоны взаимного влияния, в траектории могут возникать участки, по которым происходит переход от смещённой траектории к несмещённому участку (или наоборот), что требует учёта этих явлений при анализе и измерении параметров траекторий. Отметим, что надёжное измерение параметров слабого источника возможно только при различии синусов пеленга с ближайшим мешающим сигналом более 0,053 (в соответствии с волновым размером) антенны и при достаточном отношении сигнал/помеха.

Перейдём теперь к анализу конкретных вариантов траекторий подводного источника, представленных на рис. 5. Для характеристики выделенной траектории подводного источника начнём анализ с рис. 5, в), так как он представляет наиболее полный и подробный вариант этой траектории. Остальные варианты траекторий будем оценивать с позиций полноты и подробности информации по отношению к этому варианту. Траектория, выделена алгоритмом для обнаружения и измерения параметров слабых и рассеянных сигналов (рис. 5, в), подводный источник отмечен тонкой красной линией) состоит из 6 фрагментов, начиная с первого в направлении пеленга, синус которого равен $-0,1$. Первый фрагмент заканчивается измерениями параметров на 302 пеленгационном рельефе (на 1208 секунде с начала эпизода). Затем сигнал этого источника исчезает, (так как он пересекает траектории двух интенсивных мешающих источников) и восстанавливается (второй фрагмент) на 431 такте измерений, при этом начало его траектории смещено вправо за счёт влияния мешающего источника, траектория которого хорошо видна на рис. 5, г), а заканчивается на 764-м такте измерений со смещением влево от своей траектории. Далее формируется фрагмент 3 на интервалах измерений от 816 до 1252, где подводный источник пересекает траекторию другого мешающего источника. На интервалах измерения от 1265 до 1604 формируется четвёртый фрагмент траектории подводного источника, на интервалах от 1676 до 2077 пятый фрагмент, и на интервалах от 2217 до 2300 шестой фрагмент. В общей сложности из 2308 элементов траектории подводного источника подтверждают наличие этого сигнала только 1898 обнаруженных элементов. Теперь проанализируем, какие элементы траектории, не подвергнуты смещению и пригодны для измерения классификационного признака. Первый фрагмент пригоден для измерения ширины траектории за исключением локального участка, где происходит пересечение его траектории другим слабым источником. Отметим, что элементы второго и третьего фрагментов, подтверждают факт наличия подводного источника, поскольку эффект от его присутствия виден за счёт общего участка подводного и мешающего источника. Однако, эти фрагменты не пригодны для точного измерения элементов этой траектории из-за искажений, вызванных соседними мешающими источниками. Следует отметить, что и в первом, четвёртом, пятом и шестом фрагментах, пригодных для измерения ширины траектории, следует исключать элементы, связанные с воздействием соседних сигналов, с очень малым соотношением сигнал/помеха, пересечением измеряемой траектории другими источниками, переходные зоны, когда измеряемая траектория переходит от влияния одного источника к влиянию другого.

Рассмотрим теперь на рисунке 5 траектории, выявленные другими вариантами рассматриваемых алгоритмов. Рисунок 5, а представляет траекторию, выделенную неадаптивным алгоритмом. Проверим участки, где ранее были выявлены шесть фрагментов траектории подводного источника. Первый фрагмент траектории отчётливо просматривается, однако отличается нестабильностью, более широкой областью флюктуаций пеленга, и наличием пропущенных элементов траектории. Второй фрагмент выглядит как более широкая зона флюктуаций траектории сигнала, который пересекается с подводным источником. Третий фрагмент отчётливо выявляет наличие источника, видны сильные флюктуации пеленга на наблюдаемый источник, четвёртый фрагмент присутствует в виде отдельных точек, по которым параметры флюктуаций пеленга не удаётся определить. Пятый и шестой фрагмент также представляют совокупность отдельных

точек, по которым определить параметры флуктуаций пеленга не удаётся. В целом анализ этого варианта показывает, что при первичном наблюдении таким алгоритмом существует опасность воспринять эту траекторию не как сигнал одного источника, а как фрагменты траекторий разных сигналов и при неточном и отрывочном измерении параметров этого источника.

На рисунке 5, б представлен фрагмент траектории подводного источника, выделенной алгоритмом с усилением наиболее слабых сигналов. Характер фрагментации, проведённый для рисунка 5, в полностью сохранился. Отчётливо видны все шесть фрагментов подводного источника, однако состав слабых сигналов менее полон и менее стабилен, поскольку при построении пеленгационного рельефа используются сильные сигналы с исходными доминирующими весами. Отметим, что мощные сигналы с сильной когерентной компонентой на рисунках 4, б и 5, б имеют малую ширину траектории, и наличие рассеянной компоненты выявляется только алгоритмом, выделяющим слабые и рассеянные сигналы 4, в и 5, в.

Алгоритм, выделяющий когерентные сигналы (рисунки 4, г и 5, г), выделяют траектории с малой шириной, и только сильно рассеянные сигналы, практически без когерентной компоненты формируют широкие траектории источников.

Анализируя место рассмотренных алгоритмов в составе гидроакустического комплекса, роль первичного обнаружения следует поручить алгоритму с усилением слабых сигналов ввиду явных преимуществ при первичном обнаружении наиболее слабых сигналов и при сохранении информации об энергетических характеристиках всех сигналов в зоне наблюдения. Более детальный анализ траекторий на присутствие рассеянной компоненты позволяет провести алгоритм для выделения слабых и рассеянных сигналов, этот же алгоритм обеспечивает более точное измерение отношения сигнал/помеха слабого сигнала и контроль изменения пеленга.

На рис. 6 представлен первый фрагмент траектории подводного источника, выделенный тремя вариантами алгоритмов: а) неадаптивный; б) с усилением слабых сигналов; в) с выделением слабых и рассеянных сигналов. Для неадаптивного алгоритма ширина траектории (по пиковым выбросам относительно средней линии) составляет величину $\pm 0,015$ (0,86 градуса), для второго и третьего алгоритма разброс равен $\sim 0,007$ (0,4 градуса), что свидетельствует о существенном улучшении качества измерения параметров траектории адаптивными алгоритмами.

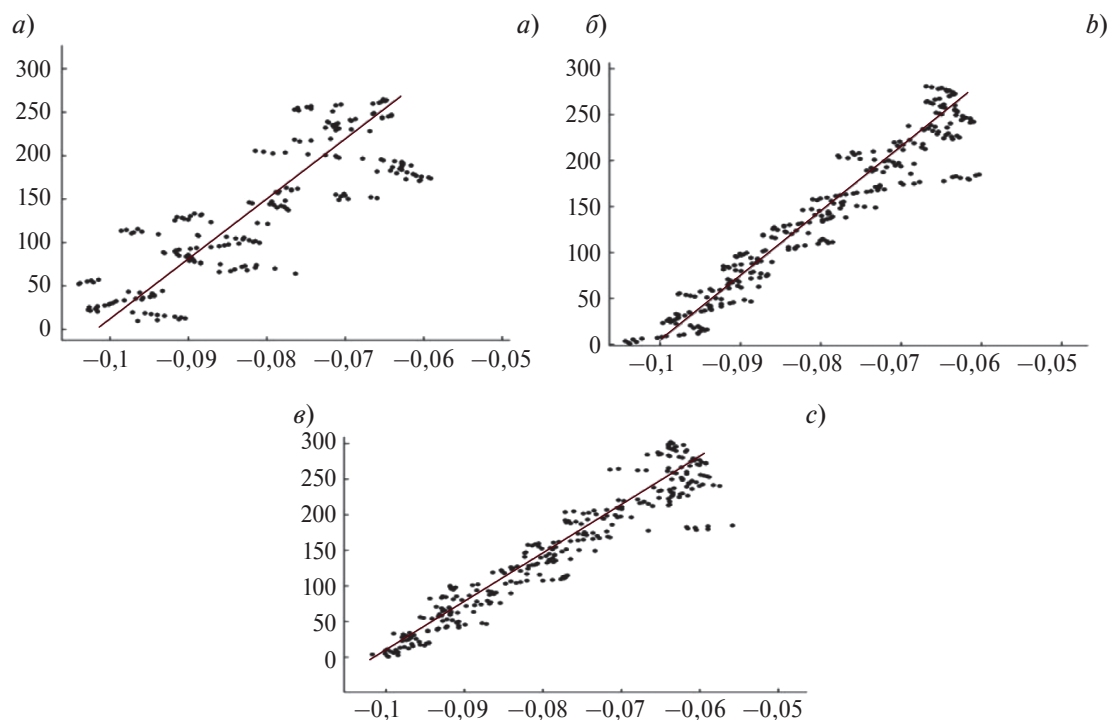


Рис. 6. Фрагмент 1 траектории подводного источника: а — неадаптивный алгоритм; б — алгоритм с усилением слабых сигналов; в — алгоритм с выделением слабых и рассеянных сигналов

Fig. 6. Fragments of the direction-finding relief of underwater source: а — nonadaptive; б — strengthening of weak signals; в — algorithm for weak and scattering signals

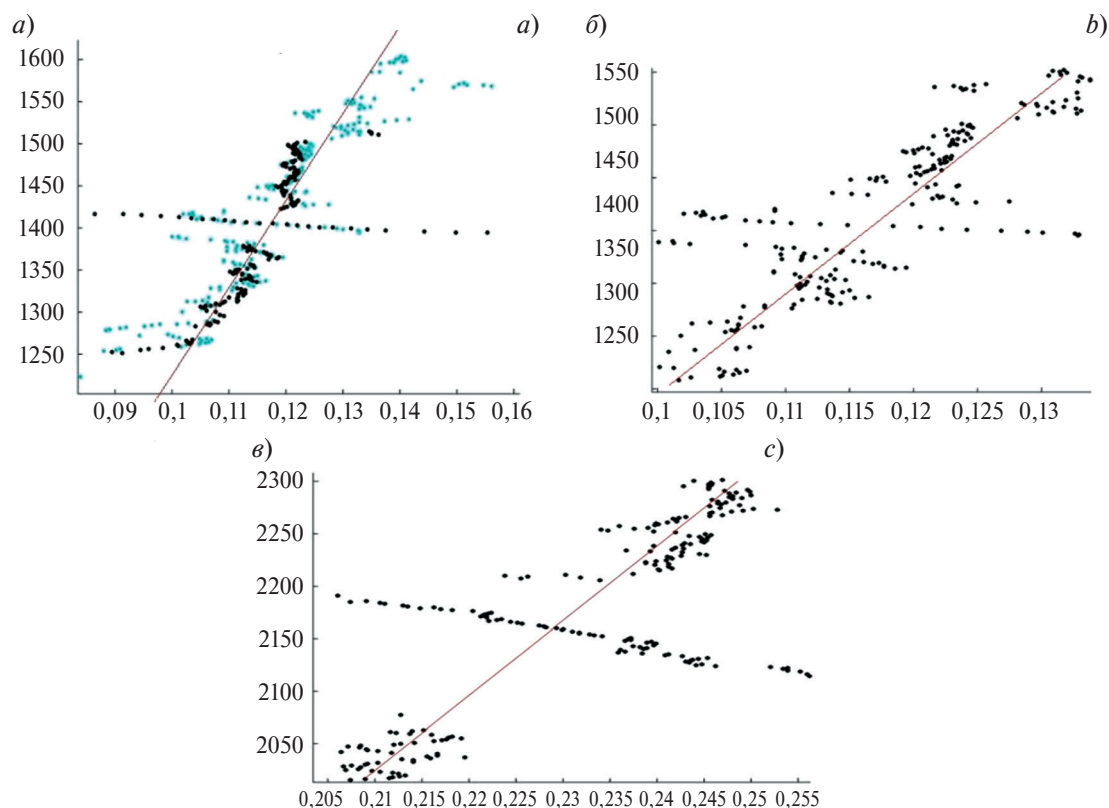


Рис. 7. Фрагменты траектории подводного источника алгоритма для обнаружения слабых и рассеянных сигналов: *a* — тёмные метки когерентный сигнал, цветные метки слабый и рассеянный сигнал; *б* — фрагмент 4; *в* — фрагменты 5 и 6

Fig. 7. Fragments of the direction-finding relief of underwater source: *a* — fragment 3, *b* — fragment 4; *c* — fragments 5 and 6

На рис. 7 представлены фрагменты 4, 5 и 6 подводного источника, в которых выделены участки вблизи зоны пересечения с мешающими сигналами от интенсивных скоростных источников, на дистанциях не более 3 км, что определяет их когерентную структуру. Фрагмент 4 на рис. 7, *a* представлен сигналами двух вариантов алгоритмов (тёмного когерентного и обнаружение слабых сигналов — цветного) вместе с участком переходной области от фрагмента 3 (номера ~1250 при пеленге от 0,09 до 0,1) и участком неточного измерения пеленга ввиду неустойчивого обнаружения очень слабого сигнала (элементы траектории с номерами ~1550 при пеленге 0,14). Об этом свидетельствует область надёжного обнаружения, где присутствует обнаружение слабого сигнала когерентным алгоритмом.

На рис. 7, *б*, в связи с наличием искажённых участков четвёртого фрагмента выделяется два элемента траектории, не подвергнутых искажению (первый с номера 1250 по 1360 и второй с номера 1445 по 1550 с интервалами измерений 440 и 420 секунд). Пиковый разброс отклонения от средней траектории равен ~0,0065, что соответствует углу 0,37 градуса. Примерно такие же результаты показывает анализ фрагментов 5 и 6 на рисунке 7, *в*), что свидетельствует о том, что на неискажённых участках флуктуации траектории обусловлены распределённой помехой и достаточно стабильны. Анализ фрагментов траектории подводного источника подтверждает, что после обнаружения сигнала в течение первого фрагмента траектории он уже мог быть классифицирован как подводный по дополнительному признаку — ширине траектории, выявленного (по данным рисунков 4, *в*, 5, *в*, 6, *в*). Без этого дополнительного признака принятие такого решения преждевременно. Отметим, что в процессе дальнейшего наблюдения (рис. 7) получено подтверждение этого решения. На рис. 8 приведена картина траекторий всех источников рассматриваемого эпизода, при этом все сигналы одновременно выделяются двумя алгоритмами, когерентным алгоритмом и алгоритмом, для обнаружения слабых и рассеянных сигналов. В эпизоде присутствует сигнал одного подводного источника, фрагменты которого проанализированы выше, имеет превышение над уровнем фона 3,2 % (0,14 дБ, что видно на рис. 2, *з*). Все остальные источники — различные варианты надводных судов и катеров в зоне наблюдения антенны ширина пространственного спектра, как правило, более 2 градусов, что видно по

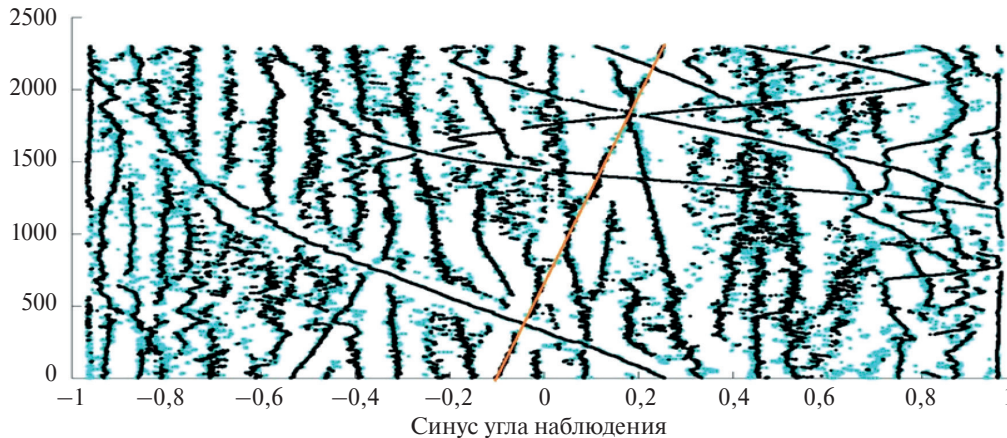


Рис. 8. Траектории источников, выделенные когерентным алгоритмом (тёмные кривые) и алгоритмом для слабых и рассеянных сигналов (цветные кривые)

Fig. 8. The direction-finding reliefs of sources: black lines — coherent signals, coloured lines — algorithm for weak and scattering signals

характеру цветных траекторий на рисунке 8. Траектории других надводных источников с узкой шириной траектории классифицируются как надводные вследствие быстрого изменения пеленга или большого отношения сигнал/помеха.

Такой вариант для совместного анализа траекторий позволяет видеть их основу с помощью первого алгоритма (тёмные кривые) в сопоставлении с дополнительной классификационной информацией пеленгационных рельефов второго алгоритма (цветные кривые). При этом (в рамках рассматриваемого эксперимента) ширина пространственного спектра флуктуаций более 0,5 градусов свидетельствует о наличии интенсивного рассеяния и определяет приповерхностную принадлежность источника. Меньшая чувствительность когерентного алгоритма к слабым сигналам позволяет выделить зоны совсем малого соотношения сигнал/помеха для алгоритма, выделяющего слабые сигналы, что позволяет исключить те участки из анализа ширины траектории, в которых слабый сигнал не обнаруживается когерентным алгоритмом.

Безусловно, для каждого конкретного гидроакустического средства эти границы индивидуальны, зависят от конкретных гидроакустических условий, объёма и степени усреднения входной выборки, надёжности и точности гидроакустических расчётов. Следует отметить, что возможность принятия такого решения зависит от точности измерения параметров, используемых как классификационные признаки. Адаптивные методы обработки в приведённых примерах обеспечивают не просто обнаружение сигналов, а более качественное измерение физических характеристик, используемых как классификационные признаки.

Отметим, что алгоритм на основе когерентных алгоритмов выявляет рассеянную компоненту только у сильно рассеянных сигналов, а в случае наличия когерентной и рассеянной компоненты первая маскирует последнюю и затрудняет зафиксировать расширение пространственного спектра. После ослабления когерентной компоненты второй алгоритм позволяет выделить уширение пространственного спектра частично рассеянного сигнала. Такой вариант отображения позволяет, определить характер основной когерентной энергетической основы принятых колебаний, и одновременно выявить наличие рассеянной составляющей, обусловленной расширением пространственного спектра при отражении от границ.

4. Заключение

Для реализации классификационных возможностей гидроакустического средства необходимо произвести качественное измерение параметров траекторий наблюдаемых источников. Это можно обеспечить использованием нескольких вариантов специализированных адаптивных алгоритмов, с помощью которых проводится измерение и оценка параметров (как известных, так и новых, детально анализирующих траектории) всех наблюдаемых источников, в том числе источников самых слабых сигналов.

Приведённые результаты показывают, что целенаправленное использование нескольких вариантов быстрых проекционных алгоритмов при построении пеленгационных рельефов позволяет улучшить условия обнаружения и измерения параметров элементов траекторий наблюдаемых источников.

Ограничение мощности наиболее сильных сигналов позволяет увеличить число обнаруженных элементов траекторий наиболее слабых сигналов и одновременно создаёт условия для выявления рассеянных компонент ограниченных сильных сигналов, наличие которых может использоваться, как дополнительные классификационные признаки надводных источников. По результатам проведённых экспериментов для более полного анализа результатов натурных данных вместо обычного неадаптивного пеленгационного рельефа целесообразно построение и анализ рассмотренных вариантов пеленгационных рельефов и их комбинирования.

Обобщение параметров измерений разными алгоритмами и принятие классификационных решений должно проводиться в результате совместного анализа результатов всех проведённых измерений.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-29-00320.

Funding

This work was supported by Grant No. 22-29-00320 of the Russian Science Foundation.

Литература

1. Малышкин Г.С., Мельканович В.С. Классические и быстрые проекционные адаптивные алгоритмы в гидроакустике. С.-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2022. 267 с.
2. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2004. 199 с.
3. Черемисин О.П., Ратынский М.В., Комов А.А., Пушин А.Е. Эффективный проекционный алгоритм адаптивной пространственной фильтрации // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 2. С. 259–263.
4. Малышкин Г.С. Экспериментальная проверка эффективности быстрых проекционных адаптивных алгоритмов // Акустический журнал. 2019. Т. 65, № 6. С. 828–846. doi:10.1134/S032079191906008X
5. Малышкин Г.С. Сравнительная эффективность классических и быстрых проекционных алгоритмов при разрешении слабых гидроакустических сигналов // Акустический журнал. 2017. Т. 63, № 2. С. 196–208. doi:10.7868/S0320791917020095
6. Машошин А.И., Курьшев И.В. Подход к повышению эффективности классификации шумящих целей в условиях интенсивных распределённых и локальных помех // Труды XII всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», ГА-2014. С.-Петербург, 2014. С. 396–399.
7. Лаваль Р., Лабаск И. Влияние неоднородностей и нестабильностей среды на пространственно-временную обработку сигналов // Подводная акустика и обработка сигналов. М.: Мир, 1985. С. 43–68.
8. Малеханов А.И. Некогерентная пространственная фильтрация мод в случайно неоднородном океаническом волноводе // Акустический журнал. 1992. Т. 38, № 5. С. 898–904.
9. Завольский Н.А., Малеханов А.И., Раевский М.А., Смирнов А.В. Влияние ветрового волнения на характеристики горизонтальной антенны в условиях мелкого моря // Акустический журнал. 2017. Т. 63, № 5. С. 501–512. doi:10.7868/S0320791917040165
10. Малышкин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Том 2. Адаптивные методы. С.-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2011. 375 с.
11. Саватеев К.Ф. Исследование факторов, влияющих на акустическую протяженность отметки сигнала в одном частотном диапазоне в интересах классификации // Труды всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». С.-Петербург, 2016. С. 307–308.
12. Саватеев К.Ф. Исследование факторов, влияющих на акустическую протяженность отметки сигнала в одном частотном диапазоне в интересах классификации // Сборник трудов КМУ-XV111, 2016. ЦНИИ «Электроприбор», С. 575–580.
13. Малышкин Г.С. Об одном методе классификации гидроакустических источников излучения на выходе адаптивной пространственной обработки // Труды всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Издательство «ЛЕМА», 2023. С. 96–100.

References

1. Malyshkin G.S., Mel'kanovich V.S. Classical and fast projection adaptive algorithms in hydroacoustics. *St. Petersburg, CNII Elektropribor*, 2022. 267 p. (in Russian).
2. Ratynskiy M.V. Adaptation and super-resolution in antenna arrays. *Moscow, Radio i Svyaz*, 2004. 199 p. (in Russian).

3. Cheremisin O.P., Ratynskiy M.V., Komov A.A., Pushin A.E. An efficient projection algorithm for adaptive spatial filtering. *Radiotekhnika i Elektronika*. 1994, 39, 2, 259–263 (in Russian).
4. Malyshkin G.S. Experimental testing of the efficiency of fast projective adaptive algorithms. *Acoustical Physics*. 2019, 65(6), 749–764. doi:10.1134/S1063771019060071
5. Malyshkin G.S. The comparative efficiency of classical and fast projection algorithms in the resolution of weak hydro-acoustic signals. *Acoustical Physics*. 2017, 63(2), 216–228. doi:10.1134/S1063771017020099
6. Mashoshin A.I., Kuryshv I.V. An approach to improve the classification efficiency of noisy targets under conditions of intense distributed and local interference. *Proceedings of All-Russian Conference “Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics”*. St. Petersburg, 2014, 396–399 (in Russian).
7. Laval R., Labask I. Influence of environmental inhomogeneities and instabilities on spatiotemporal signal processing. *Underwater acoustics and signal processing*. M., Mir, 1985, 43–68 (in Russian).
8. Malekhanov A.I. Incoherent spatial filtering of modes in a randomly inhomogeneous ocean waveguide. *Akusticheskiy Zhurnal*. 1992, 38, 5, 898–904 (in Russian).
9. Zavol'skii N.A., Malekhanov A.I., Raevskii M.A., Smirnov A.V. Effects of wind waves on horizontal array performance in shallow-water conditions. *Acoustical Physics*. 2017, 63(5), 542–552. Doi:10.1134/S1063771017040145
10. Malyshkin G.S. Optimal and adaptive methods of hydroacoustic signal processing. Vol. 2. Adaptive Methods. St. Petersburg, CNII Elektropribor, 2011. 375 p.
11. Savvateev K.F. Study of factors affecting bandwidth of acoustic signal in the same frequency range for benefit of target classification. *Proceedings of All-Russian Conference “Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics”*. St. Petersburg, 2016, 307–308.
12. Savvateev K.F. Study of factors affecting the acoustic extent of the signal mark in one frequency range in the interests of classification. *Proceedings of KMU-XVIII*, 2016, CNII Elektropribor, 575–580 (in Russian).
13. Malyshkin G.S. On a method for classifying hydroacoustic radiation sources at the output of adaptive spatial processing. *Proceedings of All-Russian Conference “Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics”*. St. Petersburg, LEMA, 2023, 96–100.

Об авторе

МАЛЫШКИН Геннадий Степанович, Доктор технических наук, профессор. ОАО «Концерн ЦНИИ “Электроприбор”», genstepmal@yandex.ru