
**ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

УДК 681.88

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БЫСТРЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

© 2019 г. Г. С. Мальшкин*

ОАО “Концерн ЦНИИ “Электроприбор”, ул. Малая Посадская 30, Санкт-Петербург, 197046 Россия

*e-mail: genstepmal@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.12.2017 г.

После доработки 10.06.2019 г.

Принята к публикации 09.07.2019 г.

Приведены основные соотношения по коррекции выборочных оценок корреляционных матриц адаптивных алгоритмов для обнаружения наиболее слабых сигналов в сложных помеховых ситуациях. Проведена обработка предлагаемыми алгоритмами натуральных данных, полученных от многоэлементной плоской антенны, установленной в морской зоне на глубине 200 м в условиях прибрежного берегового клина. Описана методика обработки натуральных данных, приведены результаты построения пеленгационных рельефов при наличии в зоне обзора более 25 источников, обусловленных судоходством. Показано, что применение адаптивных алгоритмов, целенаправленно ориентированных на обнаружение наиболее слабых сигналов, позволяет получить лучшие результаты по сравнению с результатами, полученными классическими адаптивными и неадаптивными алгоритмами.

Ключевые слова: классические и быстрые проекционные алгоритмы, многоэлементная антенна в прибрежной морской зоне, сигналы в условиях берегового клина, оценки результатов разрешения слабого сигнала

DOI: 10.1134/S032079191906008X

ВВЕДЕНИЕ

Разрешающая способность электронных средств наблюдения при обнаружении слабых сигналов в сложных помеховых ситуациях является одной из наиболее сложных и актуальных проблем, как в современной гидроакустике, так и в родственных отраслях техники. Этой теме посвящена обширная литература, синтезированы многочисленные адаптивные алгоритмы, ставшие классическими достижениями, проведены исследования их разрешающей способности [1–7]. При этом предполагается, что разработанные алгоритмы и методы пригодны для решения, в том числе, и задач гидроакустики в части повышения разрешения слабых сигналов в сложных помеховых ситуациях. Для типовой сложной гидроакустической помеховой ситуации характерно наличие в зоне обзора большого числа сигналов различной интенсивности, которые оказывают мешающее действие при обнаружении наиболее слабых сигналов с высокой приоритетностью для обнаружения, расположенных также в зоне обзора. Предметом статьи является натурная экспериментальная проверка возможности обнаружения и оценки параметров источника слабых сигналов,

которая ранее рассматривалась и обсуждалась в теоретическом плане и с использованием модельных данных [8–13].

В связи с этим возникают вопросы:

1. насколько модели сигналов и помех, использованные ранее для синтеза известных алгоритмов, соответствуют особенностям гидроакустики;
2. какие изменения в методы обработки и алгоритмы следует внести после уточнения модели распространения интенсивных мешающих сигналов;
3. каким образом можно улучшить разрешающую способность гидроакустических средств при обнаружении и оценке параметров наиболее слабых сигналов.

Анализ первого вопроса показывает, что синтез современных классических алгоритмов проводился в предположении о пространственно когерентном характере полезных гауссовых сигналов (как сильных, так и слабых) в присутствии белого шума. Между тем современные физические трактовки структуры гидроакустических сигналов можно охарактеризовать как условия многолучевого распространения при наличии

рассеяния, а помехи характеризуются существенно анизотропным фоном [14–22]. Современное представление о рассеянии исходит из его трактовки как модуляционного (мультипликативного) искажения амплитудно-фазовых характеристик распространяющегося сигнала [17, 19]. При этом параметры этих искажений обладают элементами стабильности в пространстве, по частоте и во времени, и описываются соответствующими корреляционными характеристиками [14, 17–19].

В работах [23–30] рассматривается вопрос об оптимизации обработки при приеме сигналов в случайно неоднородных волноводах, однако при этом учитывается изменение только пространственных характеристик рассеянных сигналов. Но дополнительный учет временных и частотных свойств этих искажений может предоставить новые возможности улучшения обработки при обнаружении и оценке параметров морских объектов акустическими средствами.

В рамках таких более сложных моделей возникает необходимость ослабления мешающего влияния не только когерентных, но и рассеянных компонент интенсивных источников, а наличие анизотропного помехового фона требует разработки как методов селекции слабых сигналов, так и методов оценки их параметров. Реализация этих идей становится возможной на основе использования элементов стабильности в физических характеристиках среды, целенаправленной модификации нового варианта (“быстрых”) алгоритмов [5, 6] и применения методов пространственного контраста для селекции слабых сигналов [31].

Сущность мероприятий, ориентированных на создание наиболее благоприятных условий для обнаружения наиболее слабых сигналов, заключается в следующем [10, 11]:

1. формируются выборочные оценки корреляционной матрицы адаптивных групп спектральных отсчетов в элементах антенны и проводится ее спектральное разложение;

2. адаптивные группы формируются на таких участках входной выборки, для которых функции искажений, порожденные рассеянием мешающих сигналов, близки между собой и стабильны;

3. для уменьшения маскирующего действия наиболее сильных сигналов перед вычислением выходных сигналов адаптивных алгоритмов проводится контролируемая коррекция старших собственных чисел корреляционных матриц, которую упрощенно можно трактовать как ограничение мощности наиболее сильных сигналов;

4. для ослабления наряду с когерентными составляющими сильных сигналов и их рассеянных

компонент коррекция старших собственных чисел проводится в рамках “коротких” выборок при объеме выборки меньшем, чем число элементов антенны;

5. для формирования пеленгационного рельефа проводится накопление результатов обработки адаптивных групп до объема, достаточного для обнаружения наиболее слабых сигналов;

6. реализация адаптивных алгоритмов проводится в форме, обеспечивающей наиболее экономные вычислительные процедуры с использованием сформированных пространственных каналов;

7. выделение слабых сигналов и измерение их параметров производится с использованием методов пространственного контраста.

Алгоритмы, построенные на основе изложенных предложений, рассматривались и анализировались с использованием модельных данных [10, 11]. Исходные данные при формировании модельных входных воздействий носили субъективный характер, хотя и соответствовали современным общефизическим представлениям о структуре распространяющихся в море сигналов и контролировались при назначении параметров модельных экспериментов.

В настоящей статье рассматриваются и анализируются натурные данные, получены в результате обработки записей, сделанных в морских условиях с последующей обработкой алгоритмами, разработанными и исследованными ранее в модельных условиях [10, 11]. Основная особенность рассматриваемого фрагмента натурных данных – высокая сложность помеховой ситуации, большое количество неконтролируемых источников (более 25), сложность условий распространения в условиях берегового клина. При обработке натурных данных поиск лучшего варианта заключался в использовании и сравнении:

1. модифицированных под конкретную задачу алгоритмов обработки;

2. параметров спектрального анализа;

3. степени усреднения регистрируемых результатов.

Для упрощения восприятия последующего материала приведем сведения об организации выборочных данных при проведении адаптивной обработки и методе пространственного контраста, используемом при обработке пеленгационного рельефа.

1. ВХОДНЫЕ ВЫБОРОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПРИ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКЕ И ФОРМИРОВАНИИ ПЕЛЕНГАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА

Рассмотрим особенности функционирования конкретного режима шумопеленгования и организацию вычислительного процесса обработки входных данных для реализации адаптивных методов.

Имеется гидроакустическое средство с антенной, состоящей из L элементов. В элементах антенны, с помощью вычислительных средств, проводится спектральный анализ (СА) на последовательно расположенных временных интервалах длительностью τ_1 каждый. На очередном интервале СА в каждом элементе антенны используется

$$n_{\Sigma} = n_{\max} - n_{\min} + 1 \quad (1)$$

комплексных спектральных отсчетов с номерами $n = \overline{n_{\min}, n_{\max}}$, которые перекрывают частотный диапазон режима шумопеленгования (с верхней $f_{\text{в}} = n_{\max} \frac{1}{\tau_1}$ и нижней $f_{\text{н}} = n_{\min} \frac{1}{\tau_1}$ границами по частоте), равный

$$(f_{\text{в}} - f_{\text{н}}) + \frac{1}{\tau_1} = (n_{\max} - n_{\min} + 1)\Delta F,$$

где $\Delta F = \frac{1}{\tau_1}$ – ширина спектра одного спектрального отсчета и разница частот между двумя соседними спектральными отсчетами.

В процессе наблюдения в течение каждого из интервалов СА длительности τ_1 , называемого далее также дискретными тактами СА, поступают новые результаты, и этот процесс продолжается длительное время. Предположим, что гидроакустическое наблюдение продолжается $T_{\text{лmax}}$ тактов СА. На одном такте СА входная выборка состоит из n_{Σ} вектор-столбцов комплексных спектральных отсчетов сигналов гидрофонов (элементов входной выборки X) антенны размерности L .

При реализации классических адаптивных алгоритмов для обнаружения самых слабых сигналов необходимо, чтобы число элементов выборки, используемых для оценки корреляционной матрицы и последующего формирования пеленгационного рельефа, превосходило размерность элемента входной выборки L не менее, чем в 4 раза. Назовем выборку из эпизода наблюдения, удовлетворяющую этому требованию и используемую для формирования одной реализации пеленгационного рельефа, *адаптивной*. Предположим, что ее составляют элементы входной выборки, соответствующие K смежным номерам

отсчетов по частоте и T_a смежным номерам тактов СА по времени.

В этом случае при построении пеленгационных рельефов вся совокупность спектральных отсчетов n_{Σ} разбивается на $R = \frac{n_{\Sigma}}{K}$ частотных групп с

номерами $r = \overline{1, R}$, для каждой из которых строится свой пеленгационный рельеф. Под частотной группой r понимается набор векторов $X(n, t_1)$, соответствующих спектральным отсчетам n в интервале от $(r-1)K+1$ до rK . Номер частотного отсчета в группе обозначим $p = \overline{1, K}$.

Значение K определяет величину интервала адаптации по частоте, выраженную в числе используемых в адаптивной процедуре частотных отсчетов входной выборки. Соответственно, величина T_a определяет величину интервала адаптации по времени, выраженную в количестве интервалов СА. Значение $K_a = T_a^* K$ определяет объем адаптивной выборки, обеспечивающей реализацию адаптивного алгоритма и построение пеленгационного рельефа.

Для каждой адаптивной выборки строится пеленгационный рельеф с использованием процедур, рассматриваемых далее. Суммирование пеленгационных рельефов, полученных на отдельных адаптивных выборках каждой из R частотных групп, обеспечивает повышение помехоустойчивости при приеме маломощных сигналов. Соответствующая структура эпизода наблюдения представлена на рис. 1.

На рис. 1 эпизод наблюдения представлен в виде прямоугольника, по оси ординат которого отложены номера тактов СА t_1 от 1 до $T_{\text{лmax}}$, а по оси абсцисс – номера спектральных отсчетов n от n_{\min} до n_{\max} . Эпизод наблюдения включает в себя совокупность адаптивных выборок размерностью $K \times T_a$, представленных прямоугольниками, образуемыми набором горизонтальных линий. В прямоугольнике отдельно взятой адаптивной выборки, имеющей номер интервала адаптации по частоте (номер частотной группы) r и номер интервала адаптации по времени t , каждая горизонтальная линия соответствует матрице $X(r, t)$ размерности $L \times K$ спектральных отсчетов. Эта матрица составлена из вектор-столбцов $X_p(r, t)$ размерности L , где индекс p – номер частотного отсчета в группе частот, $p = \overline{1, K}$, а t – номер интервала спектрального анализа в адаптивной выборке, со значениями от 1 до T_a .

Временная последовательность пеленгационных рельефов реализуется путем смещения по

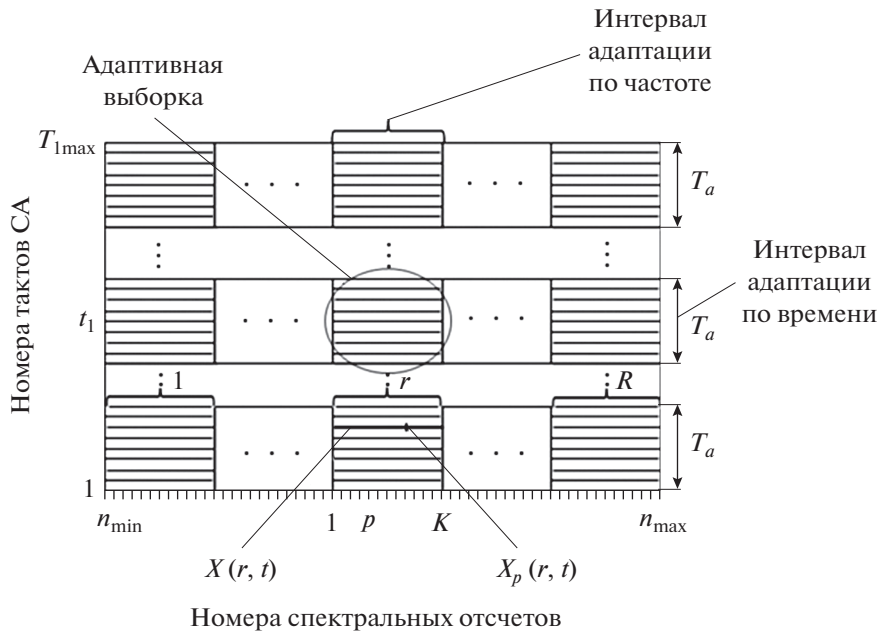


Рис. 1. Структура эпизода наблюдения.

времени элементов адаптивной выборки относительно предыдущей не на T_a , а на один или несколько тактов СА в виде окна, скользящего по последовательности индексов $1 \dots t_1 \dots T_{1max}$ по мере их поступления. Этот сдвиг времени определяет период, через который происходит регистрация результатов гидроакустического наблюдения путем построения пеленгационного рельефа.

Комплекс вопросов, связанных с использованием фокусировки, уменьшающей различие векторов направления для разных частотных отсчетов адаптивной выборки, рассмотрен в [2].

Наблюдение производится с помощью веера, состоящего из J пространственных каналов (характеристик направленности) с номерами $j = \overline{1, J}$, выходные сигналы которых составляют пеленгационный рельеф, перекрывающий заданную область пространства. При приеме сигнала, пришедшего из направления j , вектор направления $V_j(n)$ представится в виде

$$V_j^*(n) = \left[1 \dots e^{-j\omega_n \tau_q^j} \dots e^{-j\omega_n \tau_L^j} \right], \quad (2)$$

где τ_q^j – время распространения сигнала от первого элемента до элемента $q = \overline{1, L}$ при его приходе из направления наблюдения j , значок * в (2) означает эрмитово сопряжение.

Для формирования пеленгационного рельефа рассмотрим вначале два варианта формирования выборочных оценок корреляционных матриц сигналов по выходу гидрофонов антенны, с по-

мощью которых строятся различные варианты адаптивных алгоритмов.

Для реализации классических адаптивных алгоритмов используется матрица полного ранга $\hat{R}_{T_a}(r)$, построенная с использованием данных K спектральных отсчетов по частоте и T_a спектральных отсчетов по времени, в то время как для реализации “быстрых” алгоритмов по той же выборке используется набор матриц $\hat{R}(r, t)$, с использованием лишь K спектральных отсчетов для каждого из значений $t = \overline{1, T_a}$:

$$\begin{aligned} R_{T_a}(r) &= \frac{1}{T_a K} \sum_{t=1}^{T_a} \sum_{p=1}^K X_p(r, t) X_p^*(r, t) = \\ &= \frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} \hat{R}(r, t) = U_{T_a}(r) \Lambda_{T_a}(r) U_{T_a}^*(r) = \\ &= \sum_{t=1}^{T_a} U_{T_d}(r) \lambda_{T_d}(r) U_{T_d}^*(r), \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \hat{R}(r, t) &= \frac{1}{K} \sum_{p=1}^K X_p(r, t) X_p^*(r, t) = \\ &= \frac{1}{K} X(r, t) X^*(r, t) = U(r, t) \Lambda(r, t) U^*(r, t) = \\ &= \sum_{k=1}^K U_k(r, t) \lambda_k(r, t) U_k^*(r, t). \end{aligned} \quad (4)$$

В соотношениях (3), (4) приняты следующие обозначения:

$X(r, t)$ – матрица размерности $L \times K$ входной выборки, содержащая K вектор-столбцов $X_p(r, t)$ r -й группы частот на интервале СА t , $p = \overline{1, K}$;

$\Lambda_{T_a}(r)$ – диагональная матрица полного ранга L собственных чисел матрицы $\hat{R}_{T_a}(r)$ (в порядке убывания собственных чисел);

$U_{T_a}(r)$ – матрица размерности $L \times L$, составленная из L собственных векторов $U_{T_a}(r)$ матрицы $\hat{R}_{T_a}(r)$, $l = \overline{1, L}$;

$\hat{R}(r, t)$ – матрица неполного ранга K размерности $L \times L$;

$\Lambda(r, t)$ – диагональная матрица K ненулевых собственных чисел $\lambda_k(r, t)$ матрицы $\hat{R}(r, t)$;

$U(r, t)$ – матрица размерности $L \times K$ собственных векторов $U_k(r, t)$, соответствующих ненулевым собственным числам $\lambda_k(r, t)$ матрицы $\hat{R}(r, t)$, $k = \overline{1, K}$.

Соотношения (3) и (4) определяют два вида выборочных оценок корреляционных матриц, которые используются при построении двух классов адаптивных алгоритмов: классических и быстрых проекционных.

Равенство (3) вначале определяет выборочную оценку корреляционной матрицы по адаптивной выборке в целом (как результат усреднения частных матриц, оцененных по данным каждого такта СА $t = \overline{1, T_a}$), а затем представляет результат разложения накопленной корреляционной матрицы полного ранга по собственным числам и векторам. Эти собственные числа и собственные векторы далее используются для построения классических адаптивных алгоритмов.

Соотношение же (4) описывает вариант формирования T_a выборочных оценок корреляционных матриц с использованием для каждой из оценок “короткой” выборки размерностью K , что меньше, чем размерность входного вектора L . Значения старших собственных чисел этих матриц также характеризуют составляющую энергии наиболее сильных сигналов, содержащихся во входной выборке.

Методы двустороннего пространственного контраста реализуются при обработке пеленгационного рельефа в виде окна, скользящего по пространственным каналам, с сигнальным промежутком посередине, как показано на рис. 2. Например, общая ширина окна – 7 элементов пеленгационного рельефа, из них 3 таких элемента – ширина сигнальной части окна. Наружные – помеховые – элементы окна (квадратные значки) используются для оценки уровня помехи. По их данным производится прогноз уровня помехи в элементах сигнальной части окна (треугольные значки). Уровень сигнала в трех пространствен-

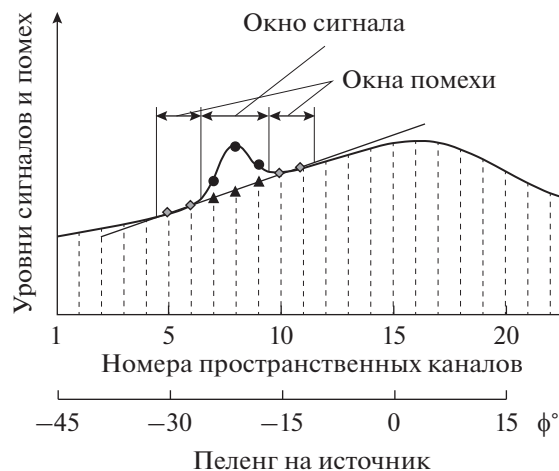


Рис. 2. Пеленгационный рельеф. Иллюстрация метода двустороннего пространственного контраста.

ных каналах сигнальной части окна определяется как разница между выходными уровнями сигнальной части пеленгационного рельефа (круглые значки) и уровнем помехи, полученным по результатам прогноза (треугольные значки). После прохода всех элементов пеленгационного рельефа сигнальная отметка фиксируется в тех точках сигнального окна, где средняя точка превышает пороговое значение уровня помехи.

Такая обработка пеленгационного рельефа позволяет не просто реагировать на уровень сигнала, а проводить дополнительную селекцию отметок слабых сигналов на фоне плавно изменяющихся сигналов от рассеянных неоднородностей сильных источников.

Для сопоставления адаптивных алгоритмов рассмотрим сравнительные особенности формирования выборочных оценок корреляционных матриц для основных вариантов классических и быстрых проекционных алгоритмов, используемых далее (рассмотренные ранее для модельных условий [11]).

2. ОСНОВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ НАТУРНЫХ ДАННЫХ

Определим соотношения для построения пеленгационного рельефа с вычислением выходных сигналов в $j = \overline{1, J}$ направлениях наблюдения (пространственных каналах).

После спектрального разложения сформированной корреляционной матрицы полного ранга

строится пеленгационный рельеф классических алгоритмов

$$C_{jT_aK}(r) = \frac{1}{V_j^*(r)[\hat{\mathbf{R}}_{T_a}(r)]^{-1}V_j(r)} = \frac{1}{V_j^*(r) \left[\frac{1}{T_a K} \sum_{t=1}^{T_a} \sum_{p=1}^K X_p(r,t)X_p^*(r,t) \right]^{-1} V_j(r)} = \frac{1}{V_j^*(r)U_{T_a}(r)\Lambda_{T_a}^{-1}(r)U_{T_a}^*(r)V_j(r)}, \quad (5)$$

где $V_j(r)$ – вектор-столбец направлений наблюдения, перебор которых $j = \overline{1, J}$ обеспечивает формирование необходимой зоны обзора для r -й адаптивной группы частот известных классических адаптивных алгоритмов (в данном случае алгоритм Кейпона). Другие классические алгоритмы используют такую же матрицу, но используют несколько другие комбинации собственных векторов для вычисления выходных сигналов.

В соотношении (5) используется матрица $\hat{\mathbf{R}}_{T_a}(r)$ полного ранга, заданная формулой (3), в составе этой матрицы можно выделить ее составную часть матрицу $\hat{\mathbf{R}}(r,t)$ размерности $L \times L$, неполного ранга, заданную формулой (4).

Выбор алгоритма Кейпона для исследования разрешающей способности обусловлен его простотой и распространенностью. При этом дальнейшие модификации этого алгоритма используют не специфичные, подчас неустойчивые, сверхразрешающие эффекты, а построены на использовании такой коррекции корреляционной матрицы, которая приводит к усилению влияния компонентов, обусловленных слабыми сигналами. Значок T_a в обозначении матрицы $\hat{\mathbf{R}}_{T_a}(r)$ подчеркивает, что после усреднения по частоте и по времени формируется матрица полного ранга и далее проводится коррекция этой матрицы полного ранга.

Следующее соотношение

$$C_{jT_aW}(r) = \frac{1}{V_j^*(r)[\hat{\mathbf{R}}_{T_aW}(r)]^{-1}V_j(r)} = \frac{1}{V_j^*(r)U_{T_a}(r)\Lambda_{T_aW}^{-1}(r)U_{T_a}^*(r)V_j(r)} \quad (6)$$

сформировано для обнаружения наиболее слабых сигналов, содержащихся во входной выборке на том же интервале ее накопления, обеспечивающем полный ранг формируемой матрицы. Состав собственных чисел $\lambda_{T_a,W}(r)$ матрицы $\Lambda_{T_aW}^{-1}(r)$, используемых для построения алгоритма СаронW, иллюстрируется кривой 3 на рис. 5 и обеспечива-

ет ослабление отметок сильных сигналов, тем самым создает благоприятные условия для обнаружения наиболее слабых сигналов при большом объеме выборки.

Соотношение

$$C_{jcorC}(r) = \frac{1}{V_j^*(r)[\hat{\mathbf{R}}_{jcorC}(r)]^{-1}V_j(r)} = \frac{1}{V_j^*(r) \left[\frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} \mathbf{U}(r,t)\Delta(r,t)\mathbf{U}^*(r,t) \right]^{-1} V_j(r)} = \frac{1}{V_j^*(r) \left[\frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} \sum_{k=1}^K U_k(r,t)\Delta_{corC}(r,t)U_k^*(r,t) \right]^{-1} V_j(r)} \quad (7)$$

решает задачу создания благоприятных условий для обнаружения наиболее слабых сигналов с помощью коррекции собственных чисел по секциям в “коротких” (быстрых) выборках на $1...t...T_a$ временных интервалах с последующим накоплением матрицы общим объемом выборок не менее $4L$.

В формуле (7)

$$\hat{\mathbf{R}}_{jcorC}(r) = \frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} \mathbf{U}(r,t)\Delta(r,t)\mathbf{U}^*(r,t)$$

– корреляционная матрица корректирована путем замены в частных матрицах

$$\hat{\mathbf{R}}(r,t) = \frac{1}{K} \sum_{p=1}^K X(r,p,t)X^*(r,p,t) = \mathbf{U}(r,t)\Delta(r,t)\mathbf{U}^*(r,t)$$

матрицы собственных чисел $\Lambda(r,t)$ размерности K на корректирующую матрицу $\Delta(r,t)$, обеспечивающую ослабление M_1 ее старших собственных чисел. Малый индекс t в обозначении матрицы $\hat{\mathbf{R}}_{jcorC}(r)$ подчеркивает, что ее коррекция проведена в короткой секции входной выборки на одном интервале спектрального анализа, а индекс C в обозначении $C_{jcorC}(r)$ подчеркивает, что вычисление элементов пеленгационного рельефа проводится по схеме, принятой для алгоритма Кейпона.

В отличие от (6) в формуле (7) во втором равенстве матрицы неполного ранга $\mathbf{U}(r,t)$ имеют размерность $L \times K$, и матрица полного ранга формируется после суммирования по времени T_a корректированных матриц неполного ранга.

В (7) коррекция коротких выборок производится с помощью матрицы $\Delta(r,t)$ размерности $K \times K$. Вариант корректирующей матрицы описан формулой (8). Сущность коррекции заключается в том, что в диагональных матрицах, сформированных из “коротких” выборок $\mathbf{X}(r,t)$, необходимо ослабить все собственные числа, порожденные

наиболее сильными сигналами, но сохранить собственные числа, порожденные слабыми сигналами. В соотношении (8) все собственные числа нормируются собственным числом с номером $M_1 + 1$, после чего устанавливаются минимальные значения старших собственных чисел таким образом, чтобы не создавать ложных трасс при формировании пеленгационного рельефа, что практически соответствует их уровню в диапазоне 0.15–0.3.

$$\Delta(r, t) = \begin{bmatrix} b_1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & b_{M_1} & & & \\ & & & \frac{\lambda_{M_1+1,t}(r)}{\lambda_{M_1+1,t}(r)} & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \frac{\lambda_{K,t}(r)}{\lambda_{M_1+1,t}(r)} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

По физическому содержанию операция коррекции соответствует ограничению мощности сильных сигналов при последующем построении пеленгационного рельефа. Эта операция устраняет из пеленгационного рельефа большую часть энергии сильных мешающих сигналов, при этом минимально ослабляется энергия, обусловленная наиболее слабыми сигналами, поскольку их основная энергия сосредоточена в малых (последних) собственных числах, обусловленных распределенной помехой и слабыми сигналами, неизменными при коррекции.

На основе алгоритма Борджотти–Лагунаса проявляется возможность более глубокого ослабления сигналов наиболее сильных источников,

$$C_{ijcorBL}(r) = \frac{V_j^*(r) \left[\frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} \mathbf{U}(r, t) \Delta(r, t) \mathbf{U}^*(r, t) \right]^{-1} V_j(r)}{L^* V_j^*(r) \left[\frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} \mathbf{U}(r, t) \Delta(r, t) \mathbf{U}^*(r, t) \right]^{-2} V_j(r)}, \quad (9)$$

создавая тем самым благоприятные условия для обнаружения и оценки параметров наиболее слабых сигналов с использованием соотношения (9). Соотношение (9) (алгоритм В-LagunasaCOR) также производит ослабление сигналов M_1 наиболее сильных источников путем коррекции собственных чисел в рамках “коротких” выборок с последующим накоплением и обращением корректированной матрицы полного ранга. Выбор алгоритма (9) одним из основных вариантов исследования обусловлен высокими характеристиками этого алгоритма [9] при разрешении слабых

сигналов в присутствии интенсивных мешающих источников [13, стр. 57–58].

Соотношение (10) производит вычисление выходных сигналов по схеме неадаптивного алгоритма в рамках “коротких” выборок, при этом матрица второго равенства (в квадратных скобках) представляет спектральное разложение корреляционной матрицы $\hat{\mathbf{R}}(r, t)$ неполного ранга

$$C_{ij}(r) = \frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} \left\{ V_j^* [\hat{\mathbf{R}}(r, t) V_j(r)] \right\} = \frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} \left\{ V_j^* [\mathbf{U}(r, t) \Lambda(r, t) \mathbf{U}^*(r, t) V_j(r)] \right\}, \quad (10)$$

где $\Lambda(r, t)$ – диагональная матрица ее собственных чисел.

Алгоритм (10) является основным при неадаптивной обработке пеленгационных рельефов, в зарубежной литературе он называется алгоритмом Бартлетта.

Неадаптивный алгоритм (10) становится адаптивным после коррекции матрицы $\Lambda(r, t)$:

$$C_{ijcorH}(r) = \frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} \left\{ V_j^*(r) [\hat{\mathbf{R}}_{icor}(r, t) V_j(r)] \right\} = \frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} \left\{ V_j^*(r) [\mathbf{U}(r, t) \Delta(r, t) \mathbf{U}^*(r, t) V_j(r)] \right\}, \quad (11)$$

при этом вместо исходных собственных чисел $\Lambda(r, t)$ используются их значения, заданные корректирующей матрицей $\Delta(r, t)$, в соответствии с соотношением (8). Соотношение (11) является наиболее простой формой адаптивного быстрого проекционного алгоритма. Обратим внимание, что в каждом элементе суммы (11), сформированном на короткой выборке, уже реализована операция ослабления сильных мешающих сигналов, что свидетельствует о возможности использования этого алгоритма для защиты от быстротекущих, в том числе импульсных помех.

В алгоритмах (6), (7) и в (11) роль обращения матриц и вычисления обращенных эффектов имеет значительно меньшее значение по сравнению с классическим алгоритмом Кейпона (5). После проведенных коррекций собственных чисел в выходных сигналах даже сильные сигналы наблюдаются как слабые при отношении сигнал/помеха меньше единицы и результаты вычислений необращенных выходных сигналов (по схеме неадаптивного алгоритма) почти не отличаются от схемы с обращением матриц (по схеме алгоритма Кейпона). Однако, реализация алгоритма (11) значительно проще, поскольку она связана с вычислением матриц значительно меньшего размера и отсутствием обращения корреляционных матриц.

Отметим еще вариант частичной коррекции посредством ортогонального проектора, в результате использования которого все собственные числа как сильных, так и слабых сигналов становятся равными единице [5, 6]

$$\begin{aligned}
 C_{ij\text{ОПР}}(r) &= \frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} \left\{ V_j^* [\mathbf{X}(r,t) [\mathbf{X}^*(r,t) \times \right. \\
 &\quad \left. \times \mathbf{X}(r,t)]^{-1} \mathbf{X}^*(r,t)] V_j(r) \right\} = \\
 &= \frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} \left\{ V_j^* [\mathbf{U}(r,t) \mathbf{U}^*(r,t)] V_j(r) \right\} = \\
 &= \frac{1}{T_a} \sum_{t=1}^{T_a} \left[\sum_{k=1}^K V_j^*(r) U_k(r,t) U_k^*(r,t) V_j(r) \right].
 \end{aligned} \tag{12}$$

Этот вариант сравнительно прост для реализации, при этом ослабляются наиболее сильные сигналы, однако возрастает уровень помехового фона в силу роста весовых коэффициентов при собственных векторах самых слабых помеховых компонент. Отметим, что описанные соотношения приведены для одной из r адаптивных групп входной выборки. При построении суммарного пеленгационного рельефа вычисляются выходные сигналы для всех $r = \overline{1, R}$ адаптивных групп с последующим суммированием сигналов всех адаптивных групп.

3. СХЕМА, ПАРАМЕТРЫ И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Проверка работоспособности рассмотренных алгоритмов проводилась с использованием натурных данных, записанных от плоской антенны, размещенной на глубине 200 м в прибрежной морской зоне в условиях берегового клина.

Антенна состоит из 56 вертикальных гирлянд, эквидистантно разнесенных по горизонтали. Элементы гирлянд имеют кардиоидную характеристику направленности, максимум которой обращен в сторону открытого моря. Временные реализации сигналов 56 таких гирлянд антенной системы подвергались цифровой регистрации (консервации) с частотой дискретизации, достаточной для точного воспроизведения сигналов на частотах ниже проектной частоты антенны.

Для обработки использовались законсервированные цифровые записи временных реализаций, полученных от каждой гирлянды, при этом их характеристика направленности в вертикальной плоскости определялась вертикальным размером гирлянд из десяти элементов, а в горизонтальной плоскости характеристикой направленностью кардиоиды. Кардиоидные элементы разнесены в горизонтальной плоскости на расстояние, равное половине длины волны на проектной частоте антенны (при которой межэле-

ментное расстояние для верхней граничной частоты равно половине длины волны).

Обработка записей выполнялась в два этапа, на первом этапе производился спектральный анализ сигналов каждой гирлянды, а на втором этапе из полученных спектральных отсчетов формировался адаптивный (или неадаптивный) веер характеристик направленности и пеленгационные рельефы, характеризующие сигнальную обстановку в пространстве вокруг антенны, что и является предметом анализа настоящей статьи.

При обработке формировался частотный диапазон со средней частотой 0.67 от проектной частоты антенны. Этот диапазон состоял из 1173 спектральных отсчетов, с относительной полосой к проектной частоте 0.56×10^{-3} . Общая протяженность анализируемого эпизода (длительностью два часа сорок минут) состояла из 4618 интервалов спектрального анализа. В процессе экспериментов исследовался также вариант сокращенного в четыре раза интервала спектрального анализа (18472 сокращенных интервалов спектрального анализа). В этом случае в рассматриваемом эпизоде в четыре раза увеличивалось число интервалов спектрального анализа, но сокращалось число спектральных отсчетов (до 292) и относительная полоса спектрального анализа достигала величины 2.24×10^{-3} . Результаты этой части эксперимента (рис. 10г) будут при упоминании приводиться в скобках.

Общий частотный диапазон при обработке составлял величину от 0.35 до 1.0 от проектной частоты антенны, так что отношение верхней граничной частоты используемого диапазона к нижней составляло величину 2.86, что составляет 1.52 октавы.

В процессе формирования пеленгационных рельефов весь частотный диапазон разбивался на 51 (12) адаптивных поддиапазонов по 23 спектральных отсчета в каждом, в пределах которых реализовались алгоритмы трех видов – неадаптивный алгоритм, классические адаптивные алгоритмы (Кейпона (5) и его модификации CaponW (6) и CaponCOR (7), а также В-Laguna-saCOR (9)) и быстрые проекционные алгоритмы для обнаружения как сильных – алгоритм (10), так и слабых сигналов (11) совместно с (8). Волновой размер антенны на средней арифметической частоте диапазона составлял величину, равную 18.92.

Адаптивное и неадаптивное формирование пеленгационных рельефов производилось при использовании сигналов 56 гирлянд, разнесенных в горизонтальной плоскости на половину длины волны на проектной частоте антенны. Вначале выходные сигналы адаптивных алгоритмов реализовались в каждом из 51 адаптивных поддиапазонов, затем эти частные результаты

суммировались в общей полосе приемного тракта. Пеленгационные рельефы строились для 151 направления наблюдения (пространственного канала), при этом выходные результаты поступали на регистрацию на каждом втором временном интервале спектрального анализа. Пеленг на обнаруженный объект определялся в результате интерполяции выходного сигнала по трем точкам (полученным в пространственных каналах) в окрестности обнаруженного сигнала. Классические алгоритмы формировали оценку корреляционной матрицы на 12 последовательных интервалах спектрального анализа (объем выборки $23 \times 12 = 276$), что в 4.9 раза больше числа адаптивных элементов антенны. Быстрые проекционные алгоритмы проводили ослабление сильных сигналов и вычисление выходного сигнала на одном интервале спектрального анализа (размерность выборки ортогонального проектора 23), а затем эти сигналы усреднялись на 12 последующих интервалах спектрального анализа. Регистрация траекторий источников сигналов выполнялась после усреднения сигналов в 51 (12) адаптивных поддиапазонах с периодом через 2 интервала спектрального анализа. Так, из 4618 интервалов спектрального анализа, выходной сигнал формировался и регистрировался на 2309 временных интервалах, с двойным интервалом СА между последовательными по времени пеленгационными рельефами.

Для варианта сокращенного интервала спектрального анализа выходной сигнал усреднялся на таком же временном промежутке (48 сокращенных интервалов СА) и регистрировался на 2309 временных интервалах СА через восемь сокращенных интервалов.

Дополнительная обработка пеленгационных рельефов проводилась при усреднении скользящим окном ряда последовательных пеленгационных рельефов на большем временном интервале, что позволяло увеличивать общее время накопления при построении пеленгационного рельефа.

Гидроакустические условия при проведении эксперимента

Основная особенность принимаемых сигналов обусловлена расположением антенны вблизи берегового клина, в результате чего характер распространяющихся сигналов определялся как профилем скорости звука, так и наличием наклонного дна. Это приводило к тому, что даже от одного источника на антенну поступали лучи с существенной разницей как углов скольжения, так и азимутов вследствие отражения от наклонного дна. Особенно сильно эти эффекты проявлялись при углах прихода в горизонтальной плоскости, близких к перпендикуляру к рабочей плоскости антенны. Такое расположение приемных элементов приводило к появлению анизотропно-

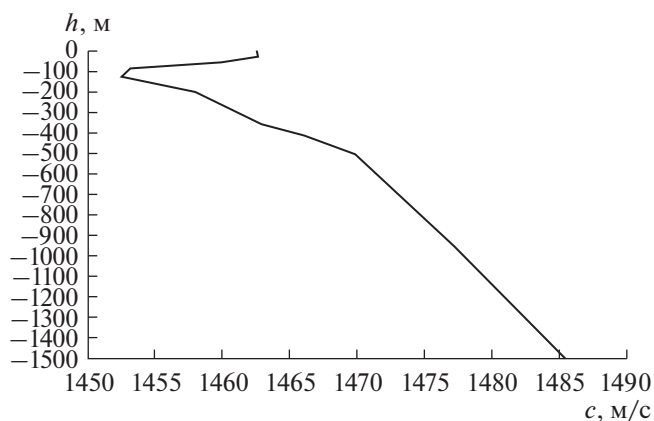


Рис. 3. Профиль скорости звука в условиях эксперимента.

го распределенного помехового фона, уровень которого существенно возрастал в направлениях вблизи оси антенны, а также к резкому увеличению плотности поступающих сигналов в боковых направлениях ввиду ухудшения разрешающей способности плоской антенны по мере отклонения от нормали к рабочей плоскости антенны.

Профиль скорости звука при проведении записей характеризовался условиями поздней осени (рис. 3). Главная особенность условий распространения для этого времени состоит в наличии берегового клина и остатков летнего подводного звукового канала. В результате чего в приповерхностном слое возник слабый приповерхностный канал, и скорость звука в этом слое превышала скорость звука на оси подводного звукового канала (120 м) и на глубине расположения антенны 200 метров.

Характеристика направленности каждого элемента антенны в вертикальной плоскости в рассматриваемой полосе частот развернута вверх на 5 градусов относительно горизонтальной плоскости. Основной лепесток характеристики направленности по уровню 0.7, шириной 16 град (по уровню 0.5—24 град) перекрывает угловой диапазон от -3 до $+13$ (по уровню 0.5 от -7 до $+17$) град.

Поскольку основным предметом последующего рассмотрения является анализ мешающего действия надводных судов, расположенных в разных направлениях относительно приемной антенны (в том числе и в направлении береговой черты), полный анализ совокупности профилей дна для всех направлений прихода мешающих сигналов выполнить сложно, так как профиль дна для каждого направления наблюдения индивидуален. Профиль дна имеет общие черты в виде плато в окрестности антенны размером 500—700 м, далее крутого склона и затем глубоководной части открытого моря. На рис. 4 приведены лучевые кар-

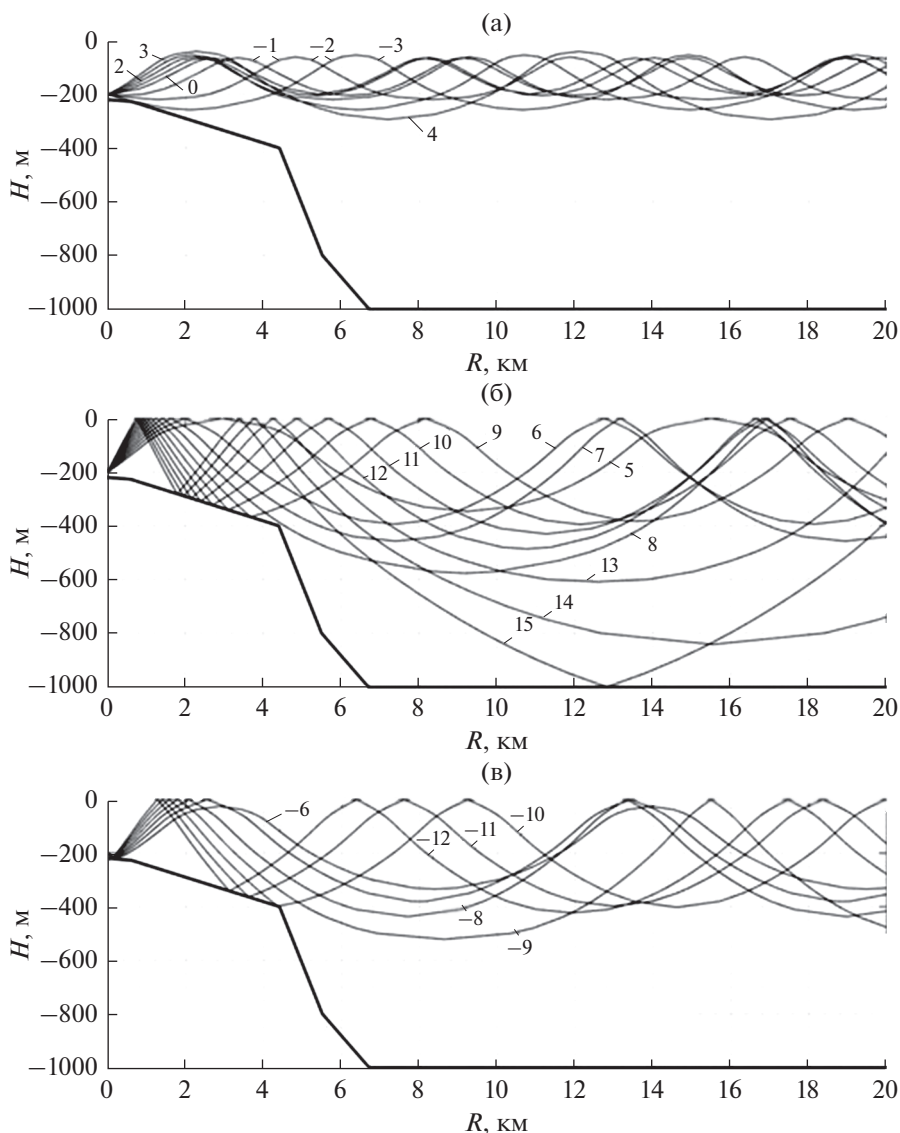


Рис. 4. Лучевые картины при обнаружении подводных и приповерхностных источников: (а) – подводные источники, (б) и (в) – приповерхностные источники.

тины и профиль дна, при профиле скорости звука, представленном на рис. 3.

Рассмотрим основные особенности распространения сигналов от подводных и надводных источников. Построим лучи, приходящие под различными углами на антенну и определим области, из которых возможно проникновение, как от подводных, так и от приповерхностных источников на рассматриваемую антенну. Отметим, что в силу того, что в приемном тракте формировался веер из 151 характеристики направленности в горизонтальной плоскости и только одна характеристика направленности в вертикальной плоскости, в рассматриваемом эксперименте на выходе элементов антенны можно было наблюдать только суммарный сигнал. Сигналы всех 56 эле-

ментов антенны (гирлянд) воспринимали суммарные сигналы всех лучей, представленных на рис. 4а, 4б и 4в, в соответствии с уровнями характеристик направленности этих элементов в вертикальной плоскости. Измерение углов скольжения в вертикальной плоскости было невозможно, поскольку при проведении цифровой записи использовались только сигналы вертикальных гирлянд, с суммированием сигналов всех 10 элементов без временных задержек.

В области основного лепестка характеристики направленности лучи с углами скольжения от -3 до $+4$ (рис. 4а) градусов не выходят к поверхности и распространяются в глубинных слоях от 50 до 250 м. Эта область характеристики направленности в данных гидроакустических условиях обеспе-

чивает зону обнаружения глубоководных источников. Например, на глубине 70 м, рассматриваемой далее, обеспечивается надежный, стабильный контакт с подводной целью с использованием водных лучей, без отражения как от поверхности, так и от дна.

Рассмотрим далее траектории проникновения звука к антенне от приповерхностных источников. В диапазоне углов скольжения более $+(5-8)$ град (рис. 4б) лучи выходят к поверхности с последующим отражением от нее и после рефракции в глубинных слоях выходят к поверхности на дистанциях до 16–18 км. При увеличении углов скольжения до $+9...+15$ град на дистанциях до 3 км возможно проникновение прямых лучей надводного источника на приемную антенну, причем последующий выход к поверхности происходит на дальностях 4–8 км после отражения от участка крутого склона и двукратного отражения от поверхности. Для лучей с углами скольжения 15 и более градусов возможен выход к поверхности на дистанциях 12–15 км после отражения от глубинных участков дна.

В области отрицательных углов скольжения ($-6...-12$ град, рис. 4в) после отражения от ближнего участка донного плато антенны формируются лучи подводного звукового канала, а при увеличении углов скольжения до -8 и более градусов наблюдается выход к поверхности с последующим отражением от области крутого склона. В целом, распространение сигналов от интенсивных приповерхностных источников обеспечивается за счет формирования сложных траекторий (представленных на рис. 4б и 4в) после отражения (часто многократных) от поверхности и различных участков дна. Такой характер распространяющихся сигналов приводит к дополнительному ослаблению интенсивности приповерхностных источников, однако их обнаружение возможно в силу высокой интенсивности излучения таких мешающих 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. Это определяет, что в соответствии с законом преломления лучей, сигналы приповерхностного источника будут приходить на антенну с углами скольжения, большими, чем при выходе из приповерхностного источника и будут отражаться от ближайших участков, как поверхности, так и дна. В таком случае, дальнейшее распространение сигнала интенсивного приповерхностного источника становится возможным только после многократного отражения от поверхности и различных участков грунта. Это определяет наруше-

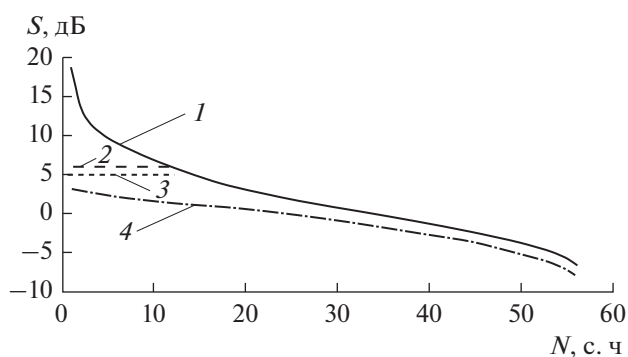


Рис. 5. Собственные числа (СЧ) вариантов классических алгоритмов: 1 – исходное распределение, 2 – выровнены старшие СЧ, 3 – CaponW, 4 – CaponCOR.

ние когерентной структуры мешающего сигнала и, следовательно, усложнение методов ослабления его маскирующего действия.

Характеризуя особенности распространения звука в условиях рассматриваемого эксперимента, следует отметить стабильный характер формирования сигнала подводного источника и крайне нестабильный, неустойчивый характер распространения сигналов приповерхностных источников. Эти сигналы, в большинстве случаев, распространяются в результате наложения прямых сигналов и сигналов, отраженных от поверхности, либо после многократного отражения от поверхности и различных участков дна. С точки зрения анализа маскирующего воздействия мешающих сигналов эта ситуация наиболее сложная, поскольку она приводит к максимальному разрушению структуры интенсивных мешающих сигналов. Причинами неустойчивой, флуктуирующей картины обнаружения и пеленгования приповерхностных источников является неустойчивый механизм формирования траекторий распространения сигналов приповерхностных источников, одновременное поступление сигналов источника с различными углами наклона по отношению к приемной антенне, нарушение когерентной структуры сигналов, отраженных в процессе распространения от различных участков поверхности и дна. Этот же фактор оказывает влияние на нестационарный характер появления и исчезновения участков траектории сигналов в процессе передвижения их источников.

Так, например, простой причиной расширения области прихода сигнала в горизонтальной плоскости и смещения оценок угла прихода является наличие угла скольжения сигнала, отличающегося от ориентации максимума характеристики направленности антенны в вертикальной плоскости на угол θ . В этом случае синус угла прихода сигнала определится соотношением [12]

$$\sin \alpha = \sin \alpha_r \cos \theta,$$

где α и α_r – измеренный и фактический пеленги на источник. Учитывая, что при малых углах скольжения $\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2}$, ошибка измерения мо-

жет достигать величины $\frac{\theta^2}{2}$. При приходе лучей с различными углами скольжения измеренный пеленг будет изменять свои параметры в зависимости от угла скольжения луча. Уточнение пеленга в горизонтальной плоскости возможно только при одновременном измерении угла скольжения в вертикальной плоскости, что не было реализовано (как упомянуто выше) в рассматриваемом эксперименте.

Аналогичная картина расширения пространственного спектра в горизонтальной плоскости может формироваться при различных углах наклона отражающих участков грунта в плоскости, перпендикулярной направлению распространения приповерхностного сигнала.

В целом, несмотря на то, что в конкретных условиях структура и параметры сигнала приповерхностного источника формируются конкретными физическими условиями и причинами, в силу их многообразия и неопределенности структура таких сигналов должна выявляться и использоваться при коррекции собственных чисел, полученных при спектральном разложении выборочных оценок корреляционных матриц. В данном примере подобран наиболее сложный эпизод, в котором число сигналов в зоне обзора особенно велико – до 25.

Рассматриваемые далее конкретные ситуации характеризуются тем, что они не контролируемы, т.е. количество и местоположение каждого источника, характер их движения априори не известны. Большая или меньшая плотность судов в окрестности антенны зависит от конкретных, постоянно изменяющихся, условий судоходства. В дальнейшем анализировалось наблюдение за движением одного слабого источника, траектория которого начиналась в направлении синуса угла от нормали к плоскости антенны -0.1 и заканчивалась в направлении 0.3 . Наряду с анализом гидроакустической обстановки для всех сигналов в зоне наблюдения, отдельное внимание будем уделять выделению траекторий этого слабого источника.

Задача эксперимента по обработке натуральных данных заключалась в исследовании и сравнении возможности гидроакустического средства выявить эти источники с использованием различных (как адаптивных, так и неадаптивных) алгоритмов, рассмотренных выше. Конкретная задача заключалась в определении возможности выявления наиболее слабых сигналов, сокращении зон потери контакта с конкретными источ-

никами при пересечении их курсов движения, выявлении источников с минимальными различиями угловых координат.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования разделяются на две части. Первая часть посвящена исследованиям помеховой ситуации с помощью классического неадаптивного алгоритма и алгоритма Кейпона, а также алгоритмов этой серии, усовершенствованных (коррекцией) для повышения разрешающей способности по отношению к наиболее слабым сигналам (CaronW, CaronCOR, B-LagunasaCOR). Несмотря на то, что алгоритмы этой серии сложны и трудоемки при практической реализации, значение этой части исследования заключается в определении принципиальной возможности улучшения разрешающей способности гидроакустических средств в условиях реального морского эксперимента.

Вторая часть экспериментов относится к исследованию разрешающей способности быстрых проекционных алгоритмов, с помощью которых не только реализуются идеи, но и определяются конкретные экономные и удобные формы их цифровой реализации в реальных объектах.

Обработка и анализ натуральных данных заключался в:

1. анализе собственных чисел входной выборки на определенном временном такте спектрального анализа одного из интервалов наблюдения;
2. построении пеленгационных рельефов, сформированных различными вариантами алгоритмов;
3. построении и анализе траекторий источников сигнала, выявленных различными вариантами адаптивных и неадаптивных алгоритмов.

Отметим, что построение траекторий принятых сигналов проведено по результатам первичной обработки принятых сигналов, без использования дополнительных возможностей вторичной обработки совокупности принятых пеленгационных рельефов.

4.1. Обработка натуральных данных с помощью классических алгоритмов и их скорректированных модификаций

Помеховая ситуация характеризовалась наличием большого количества надводных судов, которые неконтролируемо перемещались в зоне обзора гидроакустического средства. Усредненные по частотным адаптивным группам собственные числа на 12 такте спектрального анализа (по результатам обработки сигналов от первого до двенадцатого такта) представлены кривой 1 на рис. 5, где по оси абсцисс представлены номера соб-

ственных чисел (56 по числу элементов антенны), а по оси ординат соответствующее значение собственного числа (в децибелах относительно единицы). Анализ этой кривой показывает, что в этом эпизоде гидроакустического наблюдения присутствуют один весьма интенсивный источник и 12 сигналов, интенсивность которых превышает средний уровень фона. Кривые 2–5 представляют модификации собственных чисел матрицы полного ранга, используемых для оптимизации классических адаптивных алгоритмов с целью выявления слабых сигналов, присутствующих на элементах антенны.

Кривая 2 получена после того, как все старшие собственные числа приравнены значению наименее интенсивного из выбранных двенадцати. Кривая 3 характеризует распределение собственных чисел алгоритма CaponW, где старшие 12 собственных чисел ослаблены еще на 1 дБ. Четвертая кривая характеризует распределение собственных чисел алгоритма CaponCOR, где в корреляционной матрице накапливается 12 временных групп по 23 выборкам, откорректированным по секциям из 23 элементов согласно (7), (8).

На рис. 6 представлены собственные числа (также в дБ), полученные после спектрального разложения корреляционных матриц, построенных с использованием “коротких” выборок. Эти выборки используются для построения алгоритма CaponCOR (7), B-LagunasaCOR (9) и быстрых проекционных алгоритмов (11), анализ которых будет проведен в разделе 4.2.

Рассмотрим типовые пеленгационные рельефы для различных вариантов классических алгоритмов (рис. 7). Пеленгационный рельеф на рис. 7а получен после обработки с помощью неадаптивного алгоритма на 58 такте интервала выдачи данных. Общий диапазон изменения уровней пеленгационного рельефа равен ~10 дБ, при этом самые слабые сигналы составляют очень малую часть от суммарного эффекта пеленгационного рельефа. Отметим, что отметка слабого контролируемого сигнала при значении синуса -0.09 практически незаметна и будет выявлена другими алгоритмами. Для классического алгоритма Кейпона (рис. 7б) общий диапазон уровней пеленгационного рельефа сокращается до 5 дБ, но отметка слабого сигнала в направлении -0.09 начинает проявляться. Для алгоритма CaponW общий диапазон уровней сокращается до 4 дБ, отметка слабого сигнала еще более рельефно выделяется в пеленгационном рельефе. Для алгоритма CaponCOR (рис. 7г) общий диапазон уровней сокращается до 2 дБ, а упомянутая отметка слабого сигнала отчетливо проявляется в пеленгационном рельефе. Алгоритм B-LagunasaCOR (рис. 7д) формирует еще более отчетливую анализируемую отметку и выявляет отметки других, ранее не наблюдаемых сигналов.

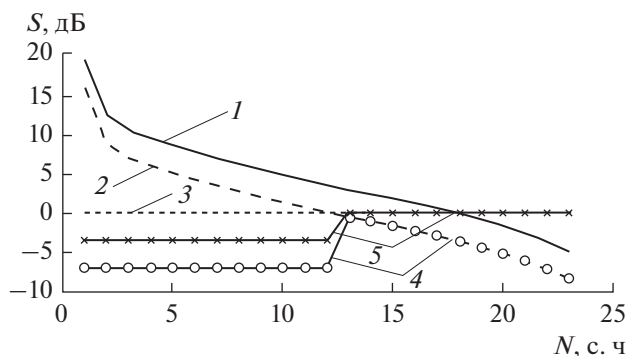


Рис. 6. Собственные числа модификаций секционной коррекции алгоритмов, оптимизируемых с помощью коротких выборок: 1 – исходное распределение (формулы (4), (10)), 2 – смещенное при нормировании, 3 – равномерное (12), 4 – скорректированное (8), (11), 5 – вариант коррекции.

Эти наглядные оценки проверяются качеством пеленгационных рельефов при обнаружении слабых сигналов и выявлении траекторий этих сигналов на длительном интервале наблюдения.

Траектории сигналов, построенные в результате анализа последовательностей пеленгационных рельефов классических алгоритмов, представлены на рис. 8–9.

На рис. 8 представлены траектории, выделенные неадаптивным алгоритмом при различной степени усреднения пеленгационных рельефов на 12 (рис. 8а) и 65 (рис. 8б) интервалах спектрального анализа, соответственно, при этом объем выборки при построении пеленгационного рельефа в первом случае равен четырнадцать тысяч, а во втором случае семьдесят тысяч. Характер выделенных траекторий на рис. 8а свидетельствует о сложной структуре акустического поля в условиях берегового клина. Об этом свидетельствуют большой диапазон флуктуаций пеленга в горизонтальной плоскости, что является следствием наличия нескольких траекторий распространения звука с различным направлением прихода как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, так что в результате интерференции этих сигналов результирующий пеленг на каждый источник изменяется в достаточно широких пределах. Увеличение времени усреднения в пять раз (рис. 8б) частично стабилизирует флуктуации пеленга. Анализируя рис. 8б, следует отметить, что неадаптивный алгоритм обеспечивает обнаружение достаточно интенсивных сигналов, при этом наблюдаются достаточно широкие зоны, в которых сигналы не обнаруживаются, отмеченные квадратами 1, 2, 3 на рис. 8а. Отметим, что увеличение времени усреднения пеленгационного рельефа для рис. 8б не приводит к существенному увеличению ясности рисунка, по сравнению с

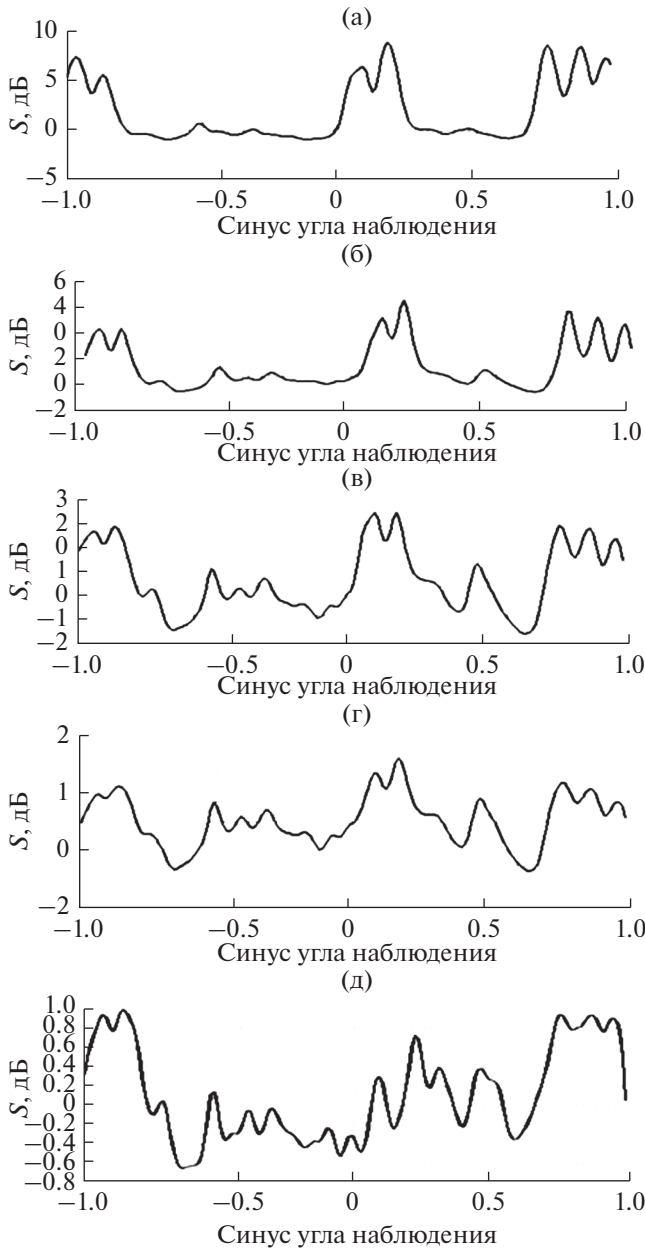


Рис. 7. Пеленгационные рельефы, сформированные различными вариантами классических алгоритмов: (а) – неадаптивный, (б) – Кейпон, (в) – CaponW, (г) – CaponCOR, (д) – V-LagunasCOR.

рис. 8а, вычисленным при меньшем времени накопления.

Практически не обнаруживается рассматриваемый контролируемый сигнал, трасса которого на рис. 8б начинается в направлении, заданном значением синуса -0.1 , и заканчивается в направлении, где синус равен 0.3 (фрагмент этого участка трассы представлен на рис. 12а). Видны небольшие участки траектории в начале и в конце интервала наблюдения; небольшой участок тра-

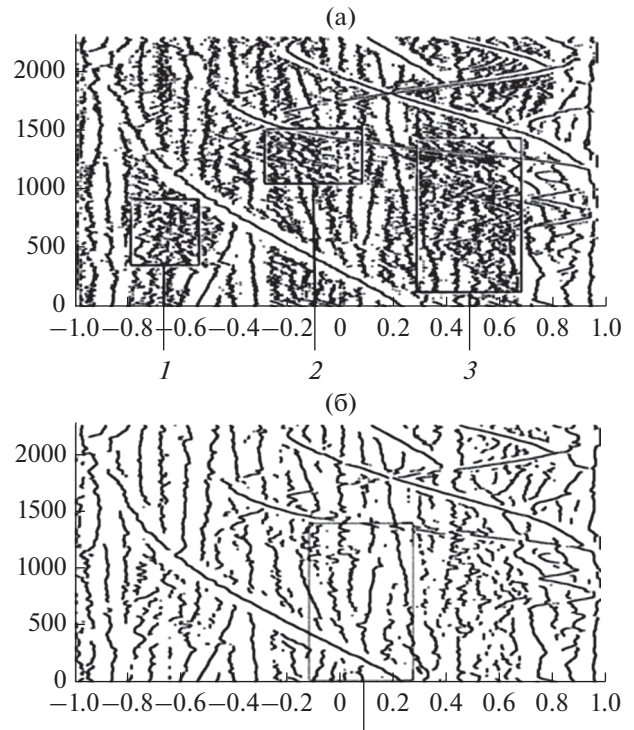


рис. 12а

Рис. 8. Траектории источников, выделенные неадаптивным алгоритмом: (а) – усреднение на 12 тактах, (б) – усреднение на 65 тактах СА.

ектории в окрестности значений синуса, равного 0.15 , не может идентифицироваться как принадлежащий этому источнику. Дальнейшее снижение порога срабатывания этого алгоритма ведет к еще большему затемнению наблюдаемой картины и затруднит выявление отдельных источников. Оценка траекторий совокупности источников становится возможной только после усреднения элементов траектории на временном интервале, равном 65 интервалам спектрального анализа.

Все это свидетельствует о сложности выявления наиболее слабых сигналов в анализируемой ситуации, и дальнейшие результаты улучшают результаты по обнаружению наиболее слабых сигналов с помощью алгоритмов, ориентированных на решение этой специфической задачи.

Для дальнейших исследований рассмотрим три типа модификаций классических алгоритмов:

1. алгоритм Кейпона как наиболее простой и известный из классических алгоритмов;
2. откорректированный для обнаружения слабых сигналов вариант алгоритма Кейпона (CaponCOR, (7) совместно с (8)), в котором проведена основная операция, рассматриваемая в статье – коррекция 12 старших собственных чисел на каждой составной части выборки из 23 ее элементов;

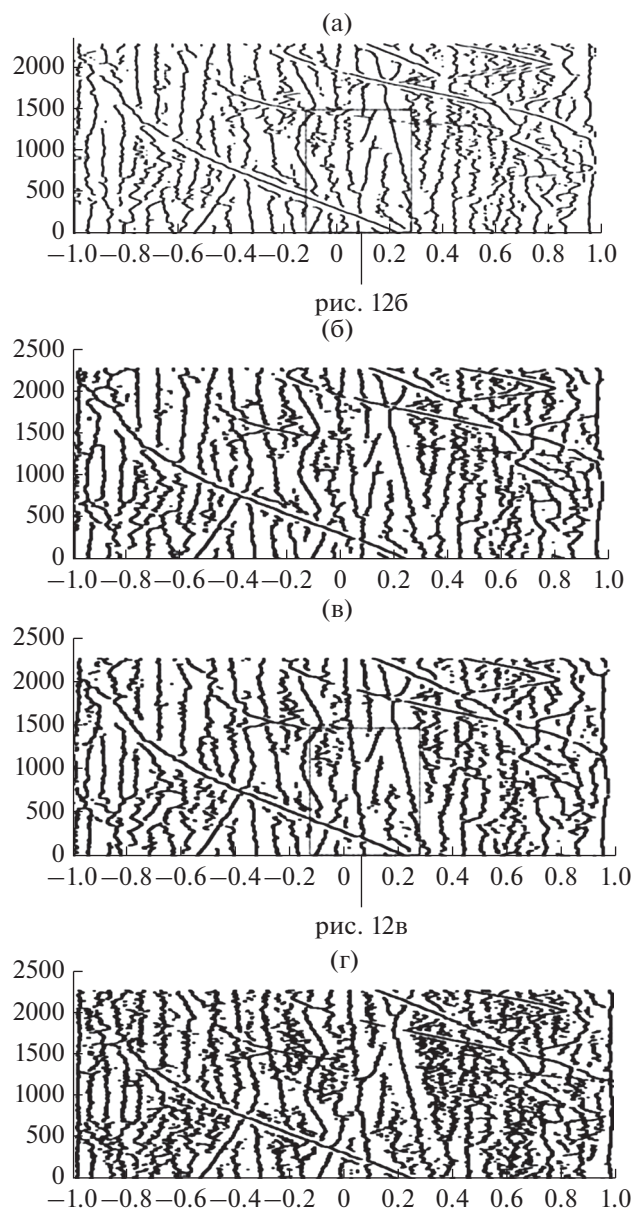


Рис. 9. Траектории сигналов, выделенные адаптивными алгоритмами: (а) – Кейпона, (б) – CaponW, (в) – CaponCOR, (г) – B-LagunasCOR.

3. алгоритм Борджотти–Лагунаса как алгоритм, обеспечивающий наиболее высокую разрешающую способность при разрешении слабых сигналов, маскируемых сильными сигналами [13, стр. 55, 58].

Применение адаптивного алгоритма Кейпона (рис. 9а) в значительной степени улучшает различимость рассматриваемой ситуации – несколько снижается зона нечувствительности в окрестности сильных сигналов, более ясными становятся области наблюдения, затемненные при использовании неадаптивного алгоритма, выявляются элементы траектории слабого наблюдаемого сиг-

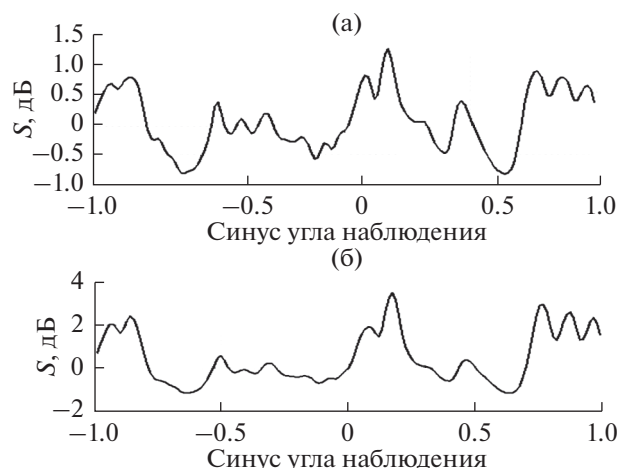


Рис. 10. Пеленгационные рельефы быстрых проекционных алгоритмов: (а) – распределение с коррекцией СЧ (11) с использованием (8), (б) – равномерное (12).

нала, количественную оценку которых оценим при дальнейшем анализе. Подробный фрагмент траектории глубоководного источника рис. 9а представлен на рис. 12б. Алгоритм CaponW (рис. 9б) дает возможность несколько расширить зону обнаружения наблюдаемого слабого сигнала, алгоритм CaponCOR (рис. 9в) позволяет получить дальнейшее расширение зоны обнаружения наблюдаемого сигнала. Пеленгационный рельеф на основе алгоритма B-LagunasOPT (рис. 9г), выявленный с помощью соотношения (9), обеспечивает выявление еще большего числа элементов траектории слабого сигнала, хотя для устранения ошибок смещения необходимо дальнейшее совершенствование методов обработки элементов траектории слабых сигналов, в окрестности отметок сильных сигналов.

4.2. Обработка натуральных данных с помощью быстрых проекционных алгоритмов

Рассмотрим результаты обработки натуральных данных двумя вариантами быстрых алгоритмов (11) и (12). На рис. 6 представлены собственные числа, формируемые (после усреднения по адаптивным группам) короткими выборками адаптивных групп на одном интервале спектрального анализа. В отличие от рис. 5, где собственные числа формировались по числу адаптивных элементов антенны, в данном случае размерность регулируемой матрицы равна размеру адаптивной группы (23). Кривая 1 характеризует средние значения исходных собственных чисел матрицы $X^*(r, t)X(r, t)$, кривая 2 – смещенное после нормировки, кривая 3 – равномерное значение собственных чисел и кривые 4 – распределение, оптимизированное для обнаружения слабых сигналов согласно соотношению (8).

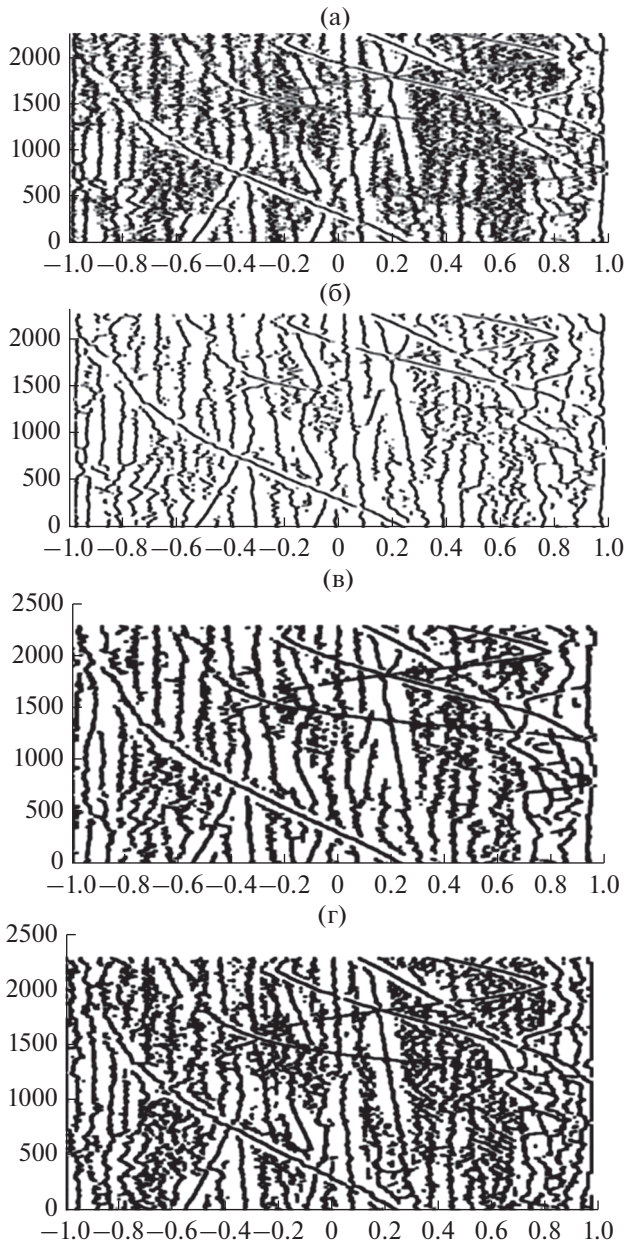


Рис. 11. Траектории, выделенные быстрым алгоритмом (11): (а) – время усреднения 12 тактов, (б) – время усреднения 65 тактов СА, (в) – алгоритм (12), усреднение 12 тактов; (г) – алгоритм (11), интервал СА уменьшен в 4 раза, усреднение 48 сокращенных тактов СА.

На рис. 10 представлены пеленгационные рельефы, полученные алгоритмами (11) и (12) после усреднения по 51 адаптивным группам и 12 интервалам спектрального анализа на 115 интервале спектрального анализа, что соответствует 58 моменту регистрации на последующих рисунках с выделенными траекториями.

Отметим, что характер пеленгационного рельефа на рис. 10а близок по характеру к пеленга-

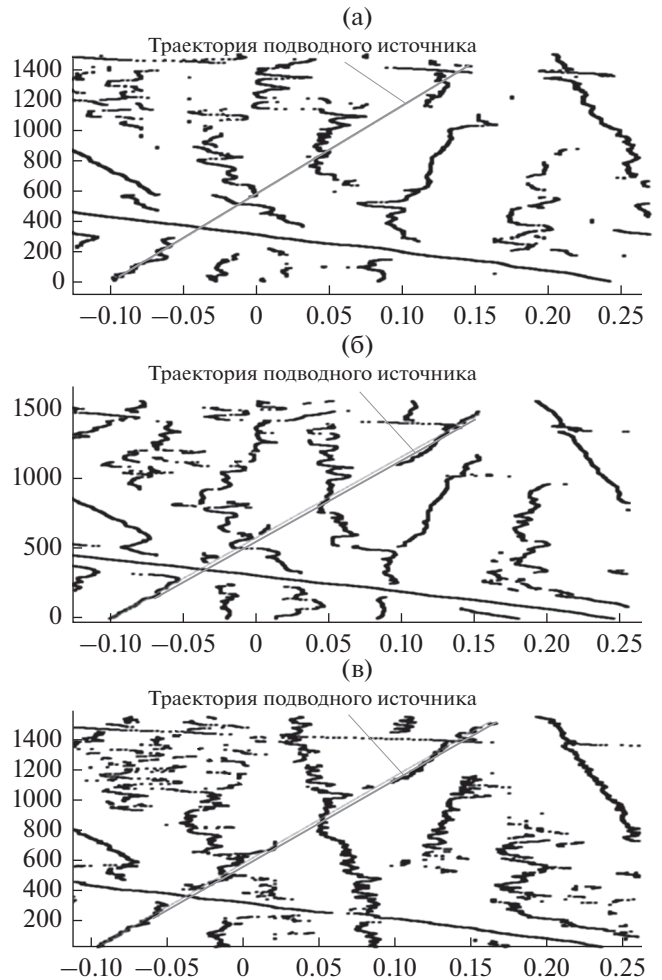


Рис. 12. Фрагменты траекторий слабого подводного сигнала, выделенные различными вариантами алгоритмов: (а) – неадаптивный алгоритм (фрагмент рис. 8б), (б) – алгоритм Кейпона (фрагмент рис. 9а), (в) – быстрые проекционные алгоритмы (фрагмент рис. 9в или рис. 11б).

ционным рельефам рис. 7г. Алгоритм (11) обеспечивает подавление сильных сигналов, создает условия для эффективного функционирования контрастных алгоритмов. Это свидетельствует о том, что корректировка весовых коэффициентов на коротком интервале выборки после усреднения выходного эффекта на полном объеме выборки формирует сигнал, аналогичный сигналу при формировании матрицы полного ранга с секционной корректировкой ее частей в классических адаптивных алгоритмах (CaronCOR), рассмотренных в подразделе 4.1.

На рис. 11 представлены траектории, выделенные алгоритмом (11), при различных временах усреднения пеленгационных рельефов – 12 интервалов СА (рис. 11а) и 65 интервалов СА (рис. 11б) при объемах выборок, аналогичных рассмотренным ранее для рис. 9.

Для небольшого интервала усреднения (рис. 11а) наблюдаются большие флуктуации пеленга на наблюдаемые объекты, что свидетельствует о сложной интерференционной структуре акустического поля в условиях прибрежного клина.

При увеличенном времени усреднения пеленгационных рельефов (рис. 11б) удается проследить трассы основных источников на протяжении всего участка наблюдения, несмотря на кратковременные потери контакта, обусловленные сложностью структуры акустического поля в прибрежном клине и исключительной сложностью помеховой ситуации. Отметим, что при меньшем интервале усреднения обеспечивается выделение несколько больших участков трассы слабого рассматриваемого глубоководного сигнала, чем при большем интервале усреднения пеленгационных рельефов.

На рис. 11в представлены пеленгационные рельефы, полученные с помощью алгоритма (12), реализующего частичное ослабление сильных сигналов с помощью ортогонального проектора. Частичное подавление сильных мешающих сигналов позволяет выявить значительные участки траектории слабого сигнала (хотя и меньшие, чем с помощью алгоритма (11)), стабилизировать значительные участки траекторий наблюдаемых сигналов.

При использовании сокращенного интервала спектрального анализа (рис. 11г) происходит ухудшение результатов обнаружения наблюдаемого источника, так как сокращается число элементов выделенной траектории, проявляются ошибки смещения. Картина пересечения траекторий становится менее четкой, размытой. Причиной этого является расширение частотных адаптивных поддиапазонов (групп) за пределы интервала корреляции по частоте.

На рис. 12 представлены фрагменты пеленгационных рельефов, содержащих участки траекторий слабого сигнала, который начинается в координатах $X = -0.1$, $Y = 1$ и завершается при $X = 0.1549$, $Y = 1483$, отмеченные тонкой линией, характеризующей истинную траекторию этого источника. Рис. 12а характеризует фрагмент рис. 8б, полученный с помощью неадаптивного алгоритма. Рис. 12б – фрагмент рис. 9а, полученный с помощью классического алгоритма Кейпона, а рис. 11в характеризует элементы близких траекторий, полученных с помощью алгоритмов (7) или (11) после коррекции старших собственных чисел “коротких” выборок.

Анализ рис. 12а показывает, что траекторию слабого источника практически невозможно выделить в пеленгационном рельефе, сформированном неадаптивным алгоритмом, поскольку последний обеспечивает выделение только одного фрагмента истинной траектории объекта. Рис. 12б

представляет несколько больше возможности для выявления траектории слабого источника, однако его слабо выраженные отметки при пересечении траектории в окрестности $X = -0.01$ и $Y = 500-700$ затрудняют сделать такой выбор. Траектории слабого источника, выделенные быстрыми проекционными алгоритмами (7) или (11), дают основание для утверждения об обнаружении и оценке параметров источника с помощью этого класса алгоритмов (рис. 12в).

Отметим, что использование алгоритмов, основанных на использовании адаптивной коррекции старших собственных чисел, приводит к более ясной картине наблюдения траекторий присутствующих источников по сравнению с неадаптивной обработкой.

Обратим внимание на различие флуктуационных явлений, возникающих при выделении различных вариантов принимаемых сигналов на рис. 12. Наибольшей стабильностью обладают траектории с быстрым изменением пеленга на объект, что обусловлено небольшим расстоянием до таких источников. Стабильность и малые флуктуации таких траекторий обусловлены тем, что, как следует из рис. 4, на дистанциях меньше ~ 3.5 км сигналы источников прямые и достигают антенну без отражений от поверхности и наклонных участков дна. Следующий вариант – относительно стабильные участки траекторий, где уровень синуса флуктуаций составляет величину до ~ 0.005 (флуктуации пеленга до 0.25 град), характеризует ситуации с однократным отражением от ровных поверхностей. Участки траекторий с уровнем флуктуаций пеленга до нескольких градусов возникают вследствие многократных отражений от расчлененных участков донной поверхности или при сильном поверхностном волнении. Детальный анализ характера структуры флуктуационных явлений различных вариантов сигналов еще предстоит провести.

Анализируя соотношение результатов, полученных с помощью классических и быстрых проекционных алгоритмов, отметим, что результаты быстрых проекционных алгоритмов оказываются близкими к результатам классических алгоритмов, откорректированных на коротких объемах выборки (7) (CaronCOR) при накоплении выборочной корреляционной матрицы классического алгоритма.

Итог эпизода в части обнаружения слабого рассматриваемого сигнала (за полное время наблюдения пересекает восемь трасс мешающих источников) заключается в следующем:

1. алгоритм CaronCOR и алгоритм (11) (с корректирующей матрицей (8)) обеспечили обнаружение 61 процента элементов трассы и разрешение с сильным сигналом один полураствор ХН и с остальными более слабыми мешающими сигналами

лами 0.68 полураствора ХН на средней частоте используемого диапазона, обеспечив удовлетворительное обнаружение и сопровождение этого источника;

2. алгоритм Кейпона (5) и алгоритм (12) обеспечили обнаружение 54.3 процента элементов трассы и разрешение с сильным сигналом 1.4 полураствора ХН и 0.73 полураствора ХН с другими более слабыми мешающими сигналами, обеспечив неустойчивое наблюдение и сопровождение этого источника;

3. неадаптивный алгоритм обеспечил обнаружение 26 процентов элементов трассы в отдельных благоприятных моментах отсутствия мешающего действия и не обеспечил обнаружение и сопровождение источника.

Результаты эксперимента показывают практически приемлемость и конкурентоспособность варианта быстрых проекционных алгоритмов, а также их перспективность для подавления быстротекущих (в том числе импульсных) мешающих воздействий.

Подводя итог проведенных исследований, следует отметить, что проблема обнаружения и оценки параметров слабых сигналов в сложных помеховых ситуациях тесно связана с пониманием физических процессов, влияющих на структуру реальных акустических сигналов в морской среде. С этой точки зрения дальнейшие исследования тонкой структуры акустических сигналов [14–30] позволят получить дополнительные возможности по решению этой проблемы.

Работа по совершенствованию и методам реализации адаптивных алгоритмов, повышающих разрешающую способность гидроакустических средств, также далеко не завершена. Но, с другой стороны, приведенные результаты свидетельствуют об определенных дополнительных возможностях по улучшению характеристик разрешения слабых сигналов в самых сложных условиях формирования мешающих сигналов с помощью методов и алгоритмов, вполне доступных в рамках современных технологий гидроакустики.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 19-08-00666 и 19-08-00253).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Capon J.* High resolution frequency–wavenumber spectral analysis // Proc. IEEE. 1969. V. 57. P. 1408–1418.
2. *Wang H., Kaveh M.* Focusing matrices for coherent signal subspace processing // IEEE Transaction Acoustic, Speech and Signal Processing. 1988. V. ASSP. 36. № 8. P. 1272–1281.
3. *Krim H., Viberg M.* Two decades of array signal processing research // IEEE Signal Processing Magazine. 1996. № 7. P. 67–95.
4. *Леховицкий Д.Н., Атаманский Д.В., Кириллов И.Г.* Разновидности “сверхразрешающих” анализаторов пространственно-временного спектра случайных сигналов на основе обеляющих адаптивных решетчатых фильтров // Антенны. 2000. № 2(45). С. 40–54.
5. *Черемисин О.П., Ратынский М.В., Комов А.А., Пушкин А.Е.* Эффективный проекционный алгоритм адаптивной пространственной фильтрации // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39. № 2. С. 259–263.
6. *Ратынский М.В.* Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2004. 199 с.
7. *Караваев В.В., Сазонов В.В.* Статистическая теория пассивной локации. М.: Радио и связь, 1987. 240 с.
8. *Малышкин Г.С.* Анализ влияния физических и технических факторов на эффективность адаптивных алгоритмов обработки гидроакустических сигналов // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 3. С. 284–299.
9. *Малышкин Г.С., Мельканович В.С.* Адаптивные алгоритмы для обнаружения и оценки параметров слабых сигналов в режиме шумопеленгования при наличии сильных мешающих источников звука // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 12. С. 32–45.
10. *Малышкин Г.С., Кузнецова А.С., Сидельников Г.Б.* Обнаружение слабых гидроакустических сигналов на основе быстрых проекционных алгоритмов // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 2. С. 237–246.
11. *Малышкин Г.С.* Сравнительная эффективность классических и быстрых проекционных алгоритмов при разрешении слабых гидроакустических сигналов // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 2. С. 196–208.
12. *Малышкин Г.С.* Оптимальные и адаптивные методы обнаружения гидроакустических сигналов. Т.1. Оптимальные методы. СПб: ОАО “Концерн “ЦНИИ “Электроприбор””, 2009. 400 с.
13. *Малышкин Г.С.* Оптимальные и адаптивные методы обнаружения гидроакустических сигналов. Т.2. Адаптивные методы. СПб: ОАО “Концерн “ЦНИИ “Электроприбор””, 2011. 374 с.
14. *Акустика океана.* Под ред. Бреховских Л.М. М.: Наука, 1974.
15. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982.
16. *Зверев В.А., Лазарев В.А., Фокин В.Н., Шаронов Г.А.* Когерентность акустических волн в океане // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 5. С. 834–840.
17. *Бьерне Л.* Неоднородности и нестабильности распространения звука под водой / В книге “Подводная акустика и обработка сигналов”. М.: Мир, 1985. 32–42 с.
18. *Гулин Э.П.* Частотно-пространственно-временная корреляция волнового поля, рассеянного неровной поверхностью // Труды АКИН. 1967. № 2. С. 49–70.
19. *Лаваль Р., Лабаск И.* Влияние неоднородностей и нестабильностей среды на пространственно-временную обработку сигналов / В книге “Подводная акустика и обработка сигналов”. М.: Мир, 1985. 43–68 с.
20. *Чернов Л.А.* Волны в случайно-неоднородных средах. М.: Наука, 1975. 172 с.

21. Чупров С.Д., Андреева И.Б. Отражение и рассеяние звука взволнованной поверхностью // В книге "Акустика океана" / Под ред. Бреховских Л.М. М.: Наука, 1974. 359 с.
22. Чупров С.Д., Швачко Р.Ф. Звуковое поле в океане с учетом случайных неоднородностей среды // В книге "Акустика океана" / Под ред. Бреховских Л.М. М.: Наука, 1974.
23. Вдовичева Н.К., Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Сазонтов А.Г. Коэффициент усиления вертикальной антенны в случайно неоднородном океаническом волноводе // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 6. С. 769–776.
24. Вировлянский А.Л., Костерин А.Г., Малахов А.Н. Флуктуации мод в каноническом подводном звуковом канале // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 2. С. 229–235.
25. Малеханов А.И., Таланов В.И. Об оптимальном приеме в многомодовых волноводах // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 5. С. 891–897.
26. Малеханов А.И. Некогерентная пространственная фильтрация мод в случайно неоднородном океаническом волноводе // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 5. С. 898–904.
27. Завольский Н.А., Малеханов А.И., Раевский М.А., Смирнов А.В. Влияние ветрового волнения на характеристики горизонтальной антенны в условиях мелкого моря // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 6. С. 501–512.
28. Sazontov A.G., Matveyev A.L., Vdovicheva N.K. Acoustic coherence in shallow water: theory and observation // IEEE J. Oceanic Engineering. 2002. V. 27. № 3. P. 653–665.
29. Сазонтов А.Г., Малеханов А.И. Согласованная пространственная обработка сигналов в подводных звуковых каналах. Обзор // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 2. С. 233–253.
30. Сазонтов А.Г., Смирнов И.П., Матвеев А.Л. Локализация источника в мелководном канале со взволнованной поверхностью // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 2. С. 233–253.
31. Белецкий Ю.С. Методы и алгоритмы контрастного обнаружения сигналов на фоне помех с априори неизвестными характеристиками. М.: Радиотехника, 2011. 429 с.