



DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(2)-8
EDN LHVFKX

УДК 681.88

© Г. С. Малышкин*, 2025

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30
*genstepmal@yandex.ru

Обнаружение и оценка параметров слабых сигналов в условиях рассеянного локального маскирующего воздействия

Статья поступила в редакцию 23.01.2025, после доработки 29.05.2025, принята в печать 12.06.2025

Аннотация

Целью статьи является количественный анализ влияния взаимосвязи физических параметров рассеяния интенсивных мешающих сигналов с параметрами «быстрых» алгоритмов на разрешающую способность при обнаружении слабых сигналов. Исследование проводится с использованием модельных данных, передаточная функция среды для мешающего источника содержит случайную составляющую, параметры которой описываются коэффициентом когерентности, интервалами корреляции в пространстве, по частоте и по времени. В модельном эксперименте параметры генерируемых рассеянных полей известны, что позволяет контролировать взаимосвязь между параметрами поля и параметрами «быстрых» алгоритмов, используемых при разрешении слабых сигналов. Приведены результаты измерения параметров компонент входной смеси, выделенных первыми и вторыми собственными числами и собственными векторами. Также приведены пеленгационные рельефы и построены траектории, выявляющие факт обнаружения слабого сигнала, пересекающего траекторию сильного сигнала, в зависимости от числа корректируемых собственных чисел. В качестве критерия качества используются уровень рассеянной компоненты и угловая зона маскировки слабого сигнала после корректировки одного или нескольких собственных чисел. Анализ шести вариантов исходных данных показал, что при использовании элементов выборки, различающихся по частоте, возможность разрешения слабых сигналов зависит от соотношения интервала адаптации и интервала корреляции (ранга) матрицы искажений по частоте.

Ключевые слова: разрешение слабых сигналов, частично рассеянный мешающий сигнал, параметры рассеянного поля и «быстрых» алгоритмов, ранг матрицы искажений по частоте

© G. S. Malyshkin*, 2025

State Research Center of the Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, JSC, 30 Malaya Posadskaya Str., St. Petersburg, 197046, Russia
*genstepmal@yandex.ru

Detection and Parameter Estimation of Weak Signals in Conditions of Scattered Local Masking Impact

Received 23.01.2025, Revised 29.05.2025, Accepted 12.06.2025

Abstract

The aim of the article is a quantitative analysis of the influence of the interrelation between the physical parameters of scattering of intense disturbing signals and the parameters of “fast” algorithms on the resolution capability when detecting weak signals. The study is conducted using model data, where the transfer function of the medium for the disturbing source contains a random component characterized by a coherence coefficient and correlation intervals in space, frequency, and time. In the model

Ссылка для цитирования: Малышкин Г.С. Обнаружение и оценка параметров слабых сигналов в условиях рассеянного локального маскирующего воздействия // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 2. С. 111–122. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-8) EDN LHVFKX

For citation: Malyshkin G.S. Detection and Parameter Estimation of Weak Signals in Conditions of Scattered Local Masking Impact. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(2):111–122. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-8)

experiment, the parameters of the generated scattered fields are known, which allows for controlling the relationship between the field parameters and the parameters of the “fast” algorithms used in the resolution of weak signals. The results of measuring the parameters of the input mixture components, highlighted by the first and second eigenvalues and eigenvectors, are presented. Pseudo-location reliefs are also provided, and trajectories are constructed which reveal the detection of a weak signal crossing the trajectory of a strong signal, depending on the number of adjusted eigenvalues. The quality criterion is based on the level of the leaked scattered component and the angular masking zone of the weak signal after the adjustment of one or several eigenvalues. An analysis of six initial data variants showed that when using sample elements differing in frequency, the possibility of resolving weak signals depends on the ratio of the adaptation interval and the correlation interval of the distortion by frequency.

Keywords: weak signal resolution, partially scattered disturbing signal, parameters of scattered field and “fast” algorithms, the distortion by frequency

1. Введение

Специфика гидроакустического наблюдения в режиме шумопеленгования заключается в наличии как большого диапазона шумности наблюдаемых объектов, так и сложной модели формирования структуры распространяющихся сигналов, которая характеризуется как условия многолучевого распространения в канале с рассеянием. Самая сложная задача — необходимость обнаружения и классификации малозумных целей, приводящая к необходимости реализации в приёмных трактах средств шумопеленгования крупногабаритных многоэлементных антенн, сложных приёмных трактов, средств отображения результатов наблюдения и анализа окружающей обстановки. Результаты наблюдения фиксируются путём построения пеленгационных рельефов, а временная последовательность этих рельефов позволяет выявить траекторию каждого источника. Измерение и анализ параметров траекторий источников дают возможность принять решение об обнаружении и произвести классификацию наблюдаемых объектов в соответствии с заданным перечнем классов.

Задача первичной обработки заключается в построении наиболее полного и качественного варианта траектории наблюдаемого объекта, что предполагает обнаружение максимально возможного числа элементов траектории (минимум пропущенных элементов) и измерение параметров элементов траектории, которые могут использоваться как классификационные признаки наблюдаемых объектов. Применительно к задаче выделения самых слабых сигналов в сложной многоцелевой ситуации это означает повышение разрешающей способности к слабым сигналам и сокращение маскирующего действия сильных сигналов. Сигналы малозумных источников наблюдаются при отношениях «сигнал/помеха» много меньше единицы, поэтому для их маскировки достаточно небольшого прироста помехового фона, обусловленного, например, рассеянными компонентами интенсивных мешающих сигналов.

Для повышения разрешающей способности разработан широкий класс адаптивных алгоритмов, которые можно разделить на два подкласса — классические [1–3] и «быстрые» проекционные [4–5]. Классические алгоритмы построены с использованием выборочных корреляционных матриц полного ранга (размерности L , равной числу элементов антенны), а «быстрые» проекционные могут строиться с использованием выборочных матриц размерности $K < L$. Для реализации адаптивных процедур классические алгоритмы используют размер выборки значительно больше L , в результате чего адаптивные процедуры проводятся с использованием существенно усреднённых входных данных. Быстрые проекционные алгоритмы проводят адаптивные процедуры с использованием слабо усреднённых входных данных (короткие, «быстрые» выборки размерности K), что позволяет лучше отслеживать текущие данные на коротком интервале наблюдения. Классические алгоритмы синтезировались применительно к когерентным моделям мешающих сигналов, которые не учитывают особенности дополнительного маскирующего эффекта, обусловленного рассеянием.

Для улучшения условий обнаружения наиболее слабых сигналов были разработаны и проверены в модельных и натуральных условиях «быстрые» проекционные алгоритмы с ограничением мощности наиболее сильных сигналов [6–9], их целевой задачей было ослабление маскирующего действия не только когерентных, но и рассеянных компонент интенсивных мешающих сигналов. Эти алгоритмы показали высокую конкурентоспособность по отношению к классическим алгоритмам в морских условиях при наличии сильного рассеяния, при этом использование быстрых проекционных алгоритмов позволяет выявить классификационные признаки наблюдаемых сигналов.

Однако успешное применение «быстрых» алгоритмов в определённых гидроакустических условиях не снимает вопрос о количественном влиянии конкретных физических параметров рассеянных мешающих сигналов на разрешающую способность при обнаружении слабого сигнала. Целью статьи является количественный анализ влияния физических параметров рассеяния интенсивных сигналов во взаимосвязи с па-

раметрами используемых «быстрых» алгоритмов на разрешающую способность при обнаружении слабых сигналов. Исследование проводится с использованием модельных данных, главным достоинством которых является то, что параметры генерируемых при модельном эксперименте полей известны и позволяют контролировать взаимосвязь между параметрами генерируемого поля и результатами разрешения слабых сигналов алгоритмами, параметры которых также известны.

2. Модельные исследования маскирующего действия рассеянного сигнала

Для построения траекторий источников используется массив спектральных отсчётов в элементах $q = \overline{1, L}$ антенны. Спектральный анализ с интервалом T_c проводится в частотном диапазоне с номерами от n_{\min} до n_{\max} на временной последовательности $1 \dots \tau \dots T_3$, где T_3 — количество интервалов спектрального анализа (1200) на эпизоде наблюдения [6–9]. Из элементов массива $N = n_{\max} - n_{\min} - 1$ ($N = 4531$) формируется входная выборка, в которой выделяется $R = \frac{N}{K}$ адаптивных групп (поддиапазонов) $r = \overline{1, R}$ спектральных отсчётов размерности $K_0 = K \times T_0$ из T_0 элементов по времени и $1 \dots k \dots K$ элементов по частоте

$$\mathbf{X}(r, \tau) = \left| X_1(r, \tau) \dots X_p(r, \tau) \dots X_{K_0}(r, \tau) \right|, \quad (1)$$

где $X_p(r, \tau)$ — p -й вектор-столбец размерности L спектральных отсчётов в элементах антенны r -адаптивной группы на τ -м интервале формирования пеленгационного рельефа; L — число элементов антенны.

В результате формируется адаптивная матрица размерности $L \times K_0$ ($K_0 < L$) вектор-столбцов спектральных отсчётов r -й адаптивной частотной группы на $t = \overline{1, T_0}$ интервалах спектрального анализа, в рамках которой реализуется адаптивная процедура ограничения мощности сильных сигналов для этой группы на τ -м эпизоде наблюдения. Фазовые сдвиги сигналов разных частот приводятся к фазовым сдвигам среднего элемента адаптивной частотной группы с помощью фокусирующих матриц [3].

Такая обработка многоканальным веером в секторе обзора проводится по элементам эпизода наблюдения, затем результаты усредняются скользящим окном в объёме ($T_a = 6$), достаточном для обнаружения слабых сигналов. В результате последовательной обработки формируются траектории источников, элементы которых содержат параметры, часть которых может использоваться как классификационные признаки.

Рассмотрим конкретные алгоритмы для реализации «быстрых» проекционных алгоритмов.

С использованием матрицы $\mathbf{X}(r, \tau)$ для адаптивной группы можно сформировать $Z_j(r, \tau) = \mathbf{X}^*(r, \tau) V_j(r)$ — вектор столбец K_0 сформированных неадаптивных пространственных каналов, а $V_j^*(r)$ — вектор j -го направления наблюдения размерности L ($j = \overline{1, J}$), используемый при вычислении сигналов r -го пеленгационного рельефа $r = \overline{1, R}$.

Сингулярное разложение матрицы $\mathbf{X}(r, \tau)$ размерности $L \times K_0$ имеет вид:

$$\mathbf{X}(r, \tau) = \left| X_1(r, \tau) \dots X_p(r, \tau) \dots X_{K_0}(r, \tau) \right| = \mathbf{U}(r, \tau) \mathbf{\Theta}(r, \tau) \mathbf{Y}^*(r, \tau), \quad (2)$$

где после первого равенства представлена матрица размерности $L \times K_0$ сигналов в элементах антенны, а после второго равенства её сингулярное разложение, где сингулярные числа и сингулярные вектора представляются в зависимости от номера собственного числа; $\mathbf{U}(r, \tau)$ и $\mathbf{Y}(r, \tau)$ — матрицы левых и правых сингулярных векторов размерности $L \times K_0$ и $K_0 \times K_0$, соответственно, а $\mathbf{\Theta}(r, \tau)$ — диагональная матрица сингулярных чисел $\theta_k(r, \tau)$, $k = \overline{1, K_0}$.

Формирование адаптивного пеленгационного рельефа для j -го направления наблюдения ($j = \overline{1, J}$) «быстро» проекционного алгоритма проводится с использованием соотношения

$$C_{jcor}^{\Sigma} = \frac{1}{T_a} \sum_{\tau=1}^{T_a} \left[\frac{1}{R} \sum_{r=1}^R Z_j^*(r, \tau) \mathbf{Y}(r, \tau) \mathbf{\Lambda}^{-1}(r, \tau) \mathbf{\Delta}(r, \tau) \mathbf{Y}^*(r, \tau) Z_j(r, \tau) \right], \quad (3)$$

где собственные числа (СЧ), элементы матрицы $\mathbf{\Lambda}(r, \tau)$ [7–9] определяются квадратом сингулярных чисел, $\lambda_k(r, \tau) = |\theta_k(r, \tau)|^2$, а собственные векторы (СВ) $\mathbf{Y}(r, \tau)$ — формулой (2).

В соотношении (3) при построении пеленгационного рельефа операция управления параметрами адаптивного алгоритма выполняется диагональной матрицей $\mathbf{\Delta}(r, \tau)$ размерности $K_0 \times K_0$, с помощью которой регулируются весовые коэффициенты компонент разложения (2). Соотношение в квадратных скобках описывает процедуру коррекции весовых коэффициентов каждой из $r = \overline{1, R}$ адаптивных групп и накопление всех R частных результатов. Дополнительное усреднение $\tau = \overline{1, T_a}$ последовательных по времени результатов позволяет увеличить объём усреднения помех, достаточный для обнаружения самых слабых сигналов.

Рассмотрим используемую модель формирования сигнала однолучёвого, частично рассеянного источника. Вектор-столбец входной выборки такого сигнала (p -го столбца r -й адаптивной группы на τ -м эпизоде наблюдения) можно представить в виде:

$$X_p(r, \tau) = g(r, \tau) S_p^2(r) x_p(r, \tau) V_{p0}(r) + [(1 - \gamma) S_p(r)]^2 x_p(r, \tau) \text{diag} \mathbf{J}_p(\mathbf{r}, \tau) V_{p0}(r), \quad (4)$$

где $\gamma(r, \tau) = g^2(r, \tau)$ — коэффициент когерентности сигнала; $g(r, \tau)$ — неслучайная часть передаточной функции среды; $x_p(r, \tau)$ — гауссов спектральный отсчёт источника единичной интенсивности на элементах антенны; $S_p(r)$ — спектральная плотность мощности p -го отсчёта r -й адаптивной группы на элементах антенны; $V_{p0}(r)$ — вектор-столбец фазовых сдвигов принимаемого сигнала на элементах антенны без учёта искажений сигнала в среде;

$\text{diag} \mathbf{J}_p(\mathbf{r}, \tau)$ — диагональная матрица размерности L , элементы которой $\mathfrak{S}_{pq}(r, \tau)$ — случайные значения функции искажений сигнала p -го столбца на q -м элементе антенны на τ эпизоде наблюдения. Произведение $\text{diag} \mathbf{J}_p(\mathbf{r}, \tau) V_{p0}(r)$ характеризует амплитуду и фазу искажённой (рассеянной) части сигнала на элементах антенны.

В соотношении (4) первое слагаемое описывает когерентную часть выборки сигнала, а второе слагаемое — рассеянную компоненту, порождённую флуктуациями функции искажений в пространстве (на элементах антенны $q = \overline{1, L}$), по частоте (спектральные отсчёты $k = \overline{1, K}$ с различными номерами) и во времени.

Модельные исследования проведём с использованием эквидистантной горизонтальной линейной антенны, состоящей из $L = 90$ элементов, на которую воздействуют сигналы трёх источников: одного сильного и двух слабых. Сильный источник (интенсивность на ненаправленном элементе $S_{31} = 0,5$) излучает сигнал из направления, перпендикулярного оси антенны, второй (слабый $S_{32} = 0,0005$) источник пересекает траекторию сильного (начало при синусе $-0,18$ и окончание при синусе $+0,18$) и третий (слабый $S_{33} = 0,0004$) контрольный источник излучает сигнал из направления, синус которого равен $0,5$ от перпендикуляра к оси антенны. Таким образом, интенсивность сильного сигнала на ненаправленном элементе в тысячу раз больше, чем у источника, пересекающего его траекторию. Третий источник находится вне зоны воздействия сигналов интенсивного источника. Сильный источник имеет коэффициент когерентности, равный $\gamma = 0,25$. Для рассеянной составляющей в адаптивной выборке при имитации задаются экспоненциальные интервалы корреляции по уровню $0,5$ в пространственной Δq , частотной ΔN и временной $\Delta \tau$ областях. Параметры Δq , ΔN , $\Delta \tau$ измеряются числом элементов антенны, числом спектральных отсчётов и числом временных отсчётов соответственно.

Значения этих параметров далее приведены в таблице для каждого варианта модельного эксперимента. Показателем качества алгоритма будем считать уровень остаточного поля сильного источника после ограничения его мощности. Вторым критерием качества адаптивного обнаружения слабого источника примем уровень потерь элементов траектории второго источника на эпизоде наблюдения. Задача модельных исследований заключается в исследовании влияния физических параметров интенсивного мешающего сигнала, а также используемых алгоритмических методов ослабления маскирующего влияния как на разрешение слабого сигнала, так и на выявление классификационных признаков сильного сигнала, т. е., в конечном счёте, на качество построенных траекторий.

При проведении модельных исследований проектная частота антенны $f_0 = 6135$ Гц, интервал спектрального анализа (СА) $T_c = 1$ с, полоса приёма одного спектрального отсчёта $\Delta F = 1$ Гц, относительная полоса одного спектрального отсчёта $dF = \frac{\Delta F}{f_0} = 0,000163$. Проектная частота соответствует межэлемент-

ному расстоянию между соседними элементами антенны, равному $d_0 = \frac{C}{2f_0}$ — половине длины волны на

проектной частоте, $C = 1500$ м/с — скорость звука в воде. Средняя частота используемого далее рабочего диапазона равна $0,625f_0$, нижняя граница $0,255f_0$, верхняя граница $0,994f_0$, общая полоса используемого диапазона состоит из 4531 спектрального отсчёта, полоса приёма разбита на $R = 181$ адаптивный поддиапазон по 25 спектральных отсчётов в каждом. Частные пеленгационные рельефы вычисляются вначале в рамках каждой адаптивной группы, суммируются в общем пеленгационном рельефе, затем для увеличения времени накопления производится дополнительное усреднение шести ($T_a = 6$) последовательных пеленгационных рельефов. В результате регистрация траектории источников проводится с использованием $181 \times 25 \times 6 = 27150$ выборок спектральных отсчётов на элементах антенны. Отношение уровня контрольного сигнала к СКО белого шума на выходе неадаптивной антенны равно $5,9$.

На рис. 1, *a* представлены основные варианты коррекции СЧ, усреднённые по результатам обработки сигналов 181 адаптивного поддиапазона (ось абсцисс — номер СЧ, ось ординат — уровень СЧ в децибелах), где 1 — исходные некорректированные уровни, 2 — откорректировано первое СЧ, 3 и 4 — откорректированы два и три старших СЧ, соответственно, 5 — все откорректированные СЧ равны единице. Каждый вариант кривой соответствует своему алгоритму, уровень каждой кривой определяет весовые коэффициенты, с которыми используются собственные векторы в соотношении (2).

На рис. 1, *б* варианты коррекции 1 и 2 соответствуют использованию первых и вторых СЧ и СВ для построения соответствующей части пеленгационного рельефа. Выделяемые СЧ имеют вес, как в некорректированной выборке, а остальные СЧ ослаблены и формируют уровень фона.

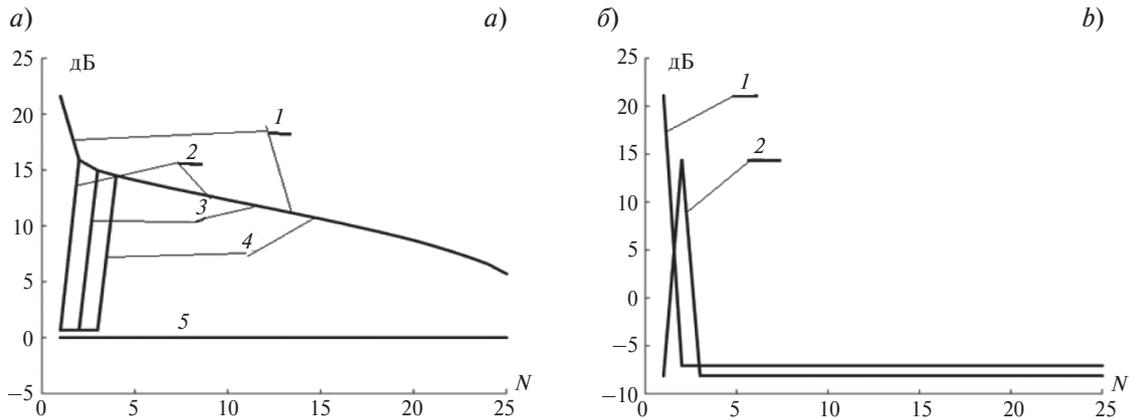


Рис. 1. *a* — 1 — исходные некорректированные СЧ; откорректировано: 2 — первое СЧ; 3 — два старших СЧ; 4 — три старших СЧ; 5 — все СЧ равны единице; *б* — весовые коэффициенты для выделения: 1 — первыми СЧ и СВ; 2 — вторыми СЧ и СВ

Fig. 1. *a* — 1 — original uncorrected eigenvalues; corrected: 2 — first eigenvalue; 3 — two largest ei-genevalues; 4 — three largest eigenvalues; 5 — all eigenvalues equal to one; *b* — Weight coefficients for allocation: 1 — for first eigenvalues and eigenvectors; 2 — for second eigenvalues and eigenvectors

На рис. 2 (59-й интервал наблюдения) представлены пеленгационные рельефы и соответствующие им полные траектории на 1200 участках эпизода наблюдения при использовании вариантов неадаптивного алгоритма и алгоритма с равными значениями всех СЧ (кривые 1 и 5 на рис. 1, *a*).

Пеленгационный рельеф, выделенный неадаптивным алгоритмом, представляет сигнал усреднённого по частоте и по времени интенсивного источника (14 дБ). При построении пеленгационных рельефов нормировка уровня (здесь и далее) проводится так, что уровень помехового фона равен единице, 0 дБ. Нижняя часть рис. 2, *a* представляет траекторию, выявленную также неадаптивным алгоритмом. На оси абсцисс показан синус направления наблюдения, на оси ординат — номер эпизода наблюдения. Отметим, что при этом траектория второго источника практически отсутствует в связи с воздействием поля мешающего источника. Обнаружены только сильный сигнал и сигнал контрольного источника при синусе 0,5.

Алгоритм с единичным значением всех СЧ (кривая 5 рис. 1) представляет вариант с частичным ослаблением маскирующего действия сильного сигнала (рис. 2, *б*). На пеленгационном рельефе (верхний рис. 2, *б*) обнаружены сигналы второго источника. В результате на соответствующей траектории, сформированной этим алгоритмом (нижний рис. 2, *б*), появились отметки второго источника, которые позволили обнаружить около 30 % его элементов.

На рис. 3, *a* и *б* представлены компоненты пеленгационного рельефа, выделенные с помощью первых и вторых СЧ соотношения (2), в соответствии с рис. 1, *б*. С помощью первых СЧ (рис. 3, *a*) выделяется основная энергия мешающего сигнала, которая включает энергию как когерентной, так и части рассеянной компоненты (близкой по направлению). С помощью вторых СЧ (рис. 3, *б*) выделяется часть рассеянной энергии этого сигнала, в результате сформирована отметка с более широким пространственным спектром и отрицательным пиком в центре. Анализ других составляющих рассеянной компоненты рассматривается далее. Нижняя часть этих рисунков формируется фоном, заданным ослабленными СЧ (рис. 1, *б*).

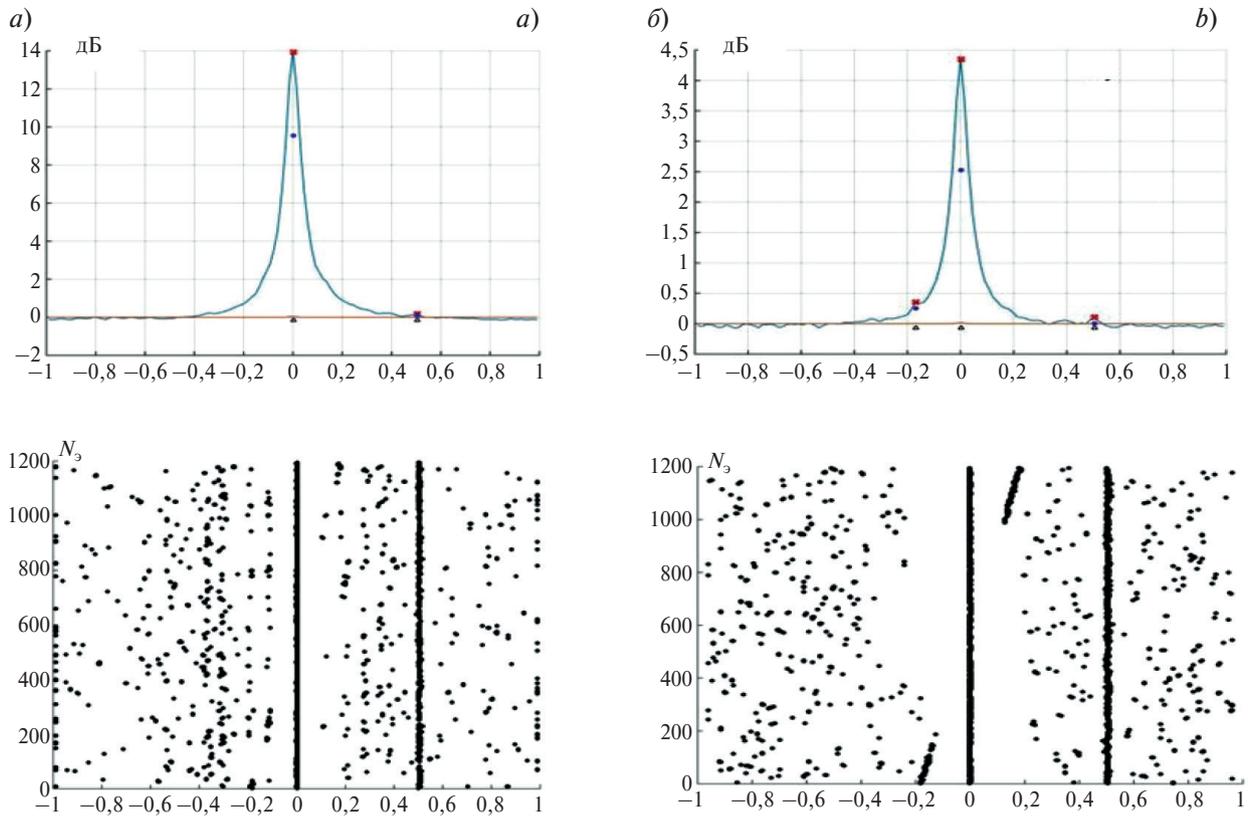


Рис. 2. Пеленгационные рельефы (верхние рисунки) и соответствующие траектории источников (нижние рисунки): *a* — коррекция по варианту 1; *b* — коррекция по варианту 5.

Fig. 2. Pseudolocation reliefs (upper plots) and corresponding trajectories of sources (lower plots): *a* — without correction; *b* — correction according to variant 5

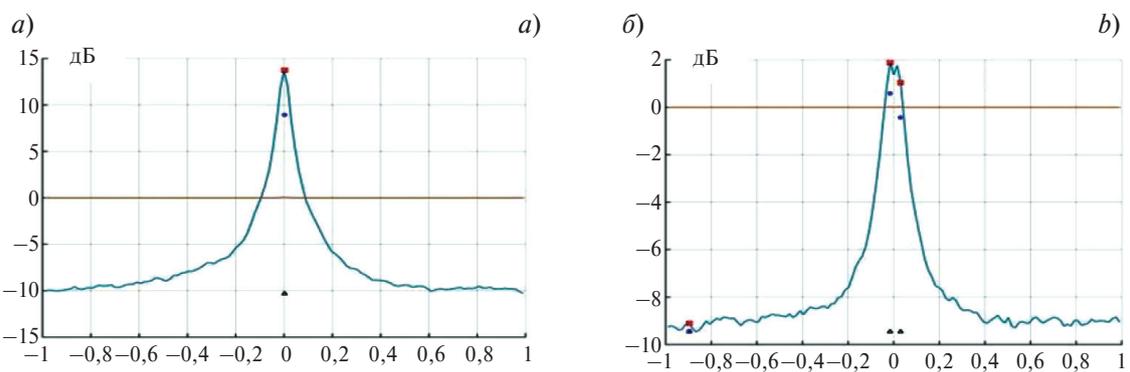


Рис. 3. Пеленгационные рельефы, выделенные первыми СЧ (*a*) и вторыми СЧ (*b*) (кривые 1 и 2 на рис. 1, *b*)

Fig. 3. Pseudolocation reliefs highlighted by first eigenvalues (*a*) and second eigenvalues (*b*) (curves 1 and 2 in Fig. 1b)

Раздельное выделение и анализ отдельных компонент разложения (2) позволил выделить часть рассеянной компоненты, которая на рис. 2, *a*) была замаскирована интенсивным мешающим сигналом.

На рис. 4 продемонстрированы три варианта пеленгационных рельефов на 59-м эпизоде наблюдения (верхние рисунки) и соответствующие траектории источников (нижние рисунки) после использования трёх вариантов алгоритмов (*a*, *b*, *в*) с весовыми коэффициентами, заданными кривыми 2, 3, 4 на рис. 1 соответственно. На рис. 4, *a*) представлен пеленгационный рельеф после коррекции первого СЧ (показано на рис. 3, *a*). Вариант рис. 4, *b*) определяет коррекцию двух компонент (показанных на рис. 3, *a*) и *b*), а вариант 4, *в*) формируется после коррекции трёх старших СЧ.

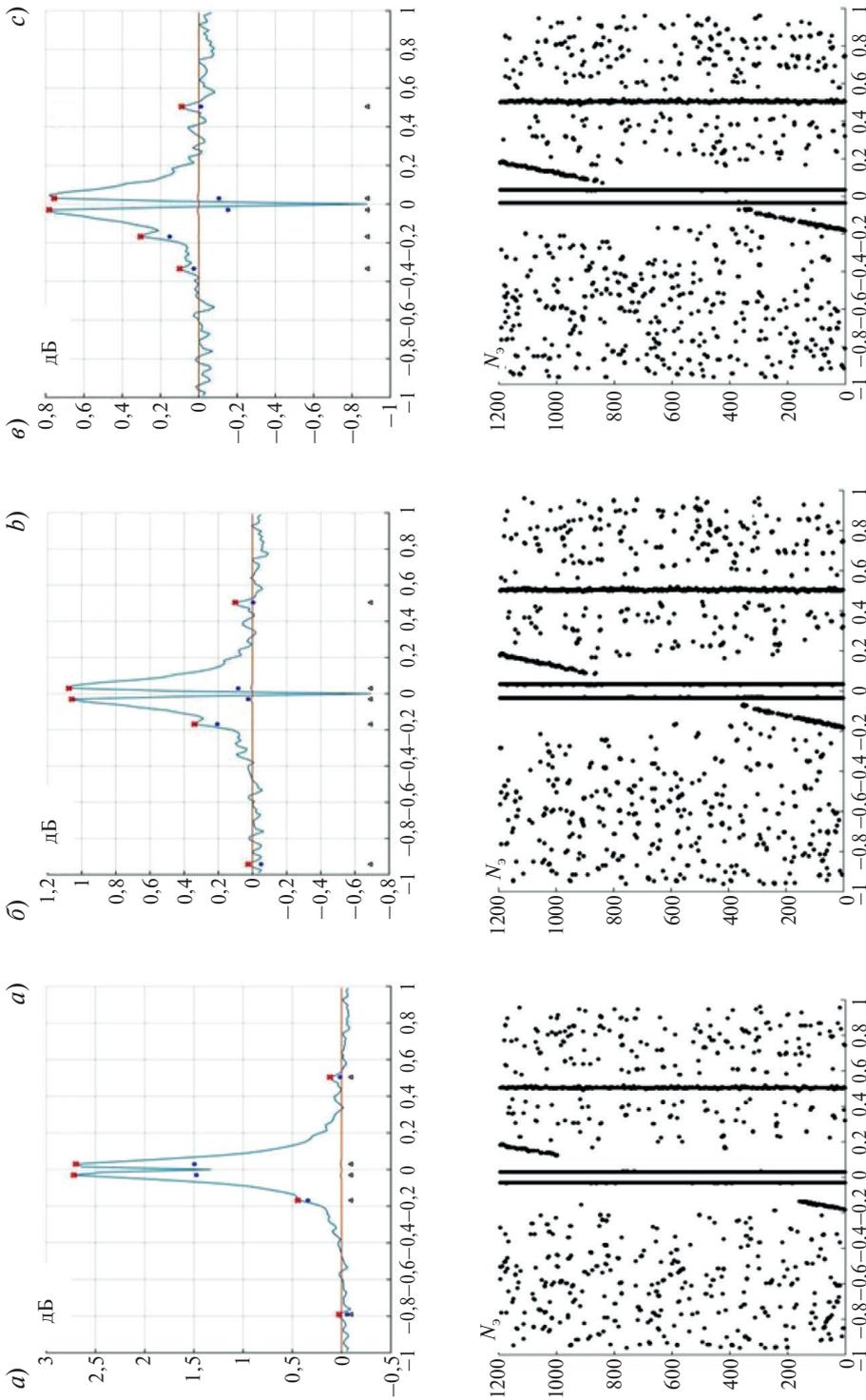


Рис. 4. Пелентационные рельефы (верхние рисунки) и траектории (нижние рисунки): *a* — коррекция одного СЧ; *b* — коррекция двух СЧ; *c* — коррекция трёх СЧ
Fig. 4. Pseudolocation reliefs (upper plots) and trajectories (lower plots): *a* — correction of one eigenvalue; *b* — correction of two eigenvalues; *c* — correction of three eigenvalues

Анализ численных результатов пеленгационных рельефов свидетельствует о том, что после коррекции первого СЧ остаток сильного сигнала над уровнем фона составляет 0,86 (2,7 дБ), двух СЧ — 0,309 (1,17 дБ) и трёх СЧ — 0,219 (0,86 дБ). Коррекция первого СЧ соответствует когерентной компенсации мешающего сигнала с помощью одного опорного канала, ориентированного на мешающий сигнал, коррекция двух и трёх СЧ — двум вариантам формирования эффекта, аналогичного формированию «широкого» нуля [10] для подавления мешающего сигнала со сложной структурой. Обратим внимание, что обнаружение контрольного сигнала на верхних рисунках происходит при его превышении ~0,08 дБ (0,02) над уровнем фона, что много меньше остаточных уровней рассеянного сигнала.

На нижних рисунках приведены выделенные рассматриваемыми алгоритмами траектории сигналов, из которых видно, что при когерентной компенсации с помощью одного СЧ обнаружено ~30 % траектории, при коррекции двух СЧ — 56 % и при коррекции трёх СЧ — 61 % траектории второго источника. Отметим, что при увеличении числа корректируемых СЧ происходит уменьшение остатка от рассеянной компоненты, при этом улучшается разрешающая способность для слабого сигнала, пересекающего траекторию сильного сигнала. Заметим, что при отсутствии коррекции (рис. 2, а) практически не обнаруживаются сигналы второго источника,

Приведённые примеры пеленгационных рельефов и траекторий относятся к одному из рассматриваемых вариантов параметров мешающих сигналов (вариант II), приведённых в таблице. Рассмотрим влияние физических параметров функции искажений рассеянных сигналов на величину и скорость уменьшения рассеянных компонент в зависимости от соотношения этих параметров и параметров используемых алгоритмов.

Сформулируем параметры используемых алгоритмов:

– число элементов линейной антенны $L = 90$, что позволяет сформировать на средней частоте рассматриваемого диапазона основной лепесток в направлении перпендикуляра к оси антенны по первым нулям шириной $\Delta\varphi_0 = 2\sin\alpha_0 = 0,0712$ ($4,08^\circ$), далее к этой величине (как некоторому эталону) будем нормировать все результаты измерений разрешающей способности по угловой координате;

– объём адаптивной выборки $K_0 = 25$ элементов, отличающихся по частоте (варианты I–V), $K_0 = 26$ элементов (13 элементов на двух временных интервалах, вариант VI);

– варианты коррекции (неадаптивный приём S, коррекция одного S_1 , двух S_2 и трёх S_3 СЧ).

В численных экспериментах использовались параметры рассеяния сильного источника:

– коэффициент когерентности мешающего сигнала $\gamma = 0,25 \Delta q$ ($g = 0,5$);

– интервал корреляции флуктуаций искажений по частоте на уровне 0,5: $\Delta N = 6,6, 16,9, 67,7$ спектральных отсчётов, что составляет отношение $K_0/\Delta N$, равное 3,79, 1,48 и 0,37, соответственно;

– интервал корреляции флуктуаций искажений по пространству $\Delta q = 16,9, 33,86$ элементов антенны, что определяет пространственную область рассеяния в 5,3 и 2,7 раза шире основного лепестка 90-элементной антенны на средней частоте используемого диапазона;

– интервал корреляции флуктуаций искажений по времени $\Delta\tau = 33,86$ интервалов СА, что определяет корреляцию между двумя соседними по времени отсчётами, равную 0,98.

Таблица

Table

Основные результаты модельного эксперимента
 Key Results of the Model Experiment

№ варианта	I	II	III	IV	V	VI
Δq	33,86	33,86	33,86	16,9	16,9	16,9
$\Delta\tau$	33,86	33,86	33,86	33,86	33,86	33,86
ΔN	6,6	16,9	67,7	67,7	16,9	16,9
K_0	25	25	25	25	25	13×2
$K_0/\Delta N$ (ранг)	3,79 (4)	1,48 (2)	0,37 (1)	0,37 (1)	1,48 (2)	0,77×2 (2)
S	26,5	26,2	25,6	21,03	20,13	20,13
S_1	1,64	0,86	0,236	0,268	1,03	1,85
S_2	0,46	0,309	0,13	0,156	0,32	0,35
S_3	0,28	0,219	0,096	0,117	0,239	0,237
$\Delta\varphi_1/\Delta\varphi_0$	1,96	1,83	0,98	1,06	1,68	1,89
$\Delta\varphi_2/\Delta\varphi_0$	1,62	1,07	0,98	1,01	1,06	0,98
$\Delta\varphi_3/\Delta\varphi_0$	1,19	1,04	0,98	0,98	0,91	0,98

В таблице представлены параметры шести вариантов исследованных исходных данных. Варианты I–V формируют адаптивную выборку из сигналов, отличающихся по частоте, следовательно, основным параметром, определяющим ранг адаптивной выборки, является соотношение между объёмом выборки и интервалом корреляции функции искажений по частоте. Для первого варианта это соотношение равно 3,79, следовательно, на интервале адаптации будут реализоваться практически четыре некоррелированных варианта искажений и рассеянный сигнал будет описываться четырьмя СЧ и собственными векторами. Поэтому для полного подавления рассеянной компоненты необходимо откорректировать четыре СЧ. Второй вариант имеет соотношение $K_0/\Delta N$, равное 1,48, и для подавления рассеянной части сигнала достаточно коррекции двух СЧ. В третьем варианте этот параметр равен 0,37, следовательно, ранг адаптивной выборки равен единице, и для реализации подавления достаточно откорректировать одно СЧ. Четвёртый вариант отличается от третьего тем, что проводится расширение пространственной зоны мешающего воздействия в два раза (интервал пространственной корреляции Δq уменьшился до 16,9 вместо 33,86), но ранг адаптивной матрицы остался равным единице. Пятый вариант, аналогично предыдущему, наряду с расширением зоны мешающего воздействия предлагает уменьшение интервала частотной корреляции ΔN до 16,9, так что ранг адаптивной матрицы становится равным двум. Шестой вариант использует адаптивную матрицу размерности 26 из 13 элементов по частоте на двух последовательных интервалах спектрального анализа. В этом случае ранг адаптивной матрицы равен двум, поскольку $K_0/\Delta N = 0,77$ реализуется на двух последовательных по времени интервалах СА.

На рис. 5 приведены основные результаты измерения остаточного уровня рассеянного поля (a , ϑ) (на 59-м элементе траектории) и зон потери контакта со слабым источником (b , ε) для шести вариантов исходных данных, показанных в таблице. Все приведённые графики на рис. 1–4 и соответствующие описания основаны на результатах II варианта исходных данных.

Рассмотрим основные результаты модельного эксперимента по ослаблению уровня рассеянной компоненты в зависимости от количества корректируемых СЧ. Первый вариант исходных данных (рис. 5, a) характеризуется высоким уровнем остаточного поля 4,22 дБ (1,64 от уровня фона) после коррекции одного СЧ. Этот уровень ослабляется при коррекции двух СЧ 1,65 дБ (0,46 от уровня фона) и при коррекции трёх СЧ достигает 1,1 дБ (0,28 от уровня фона).

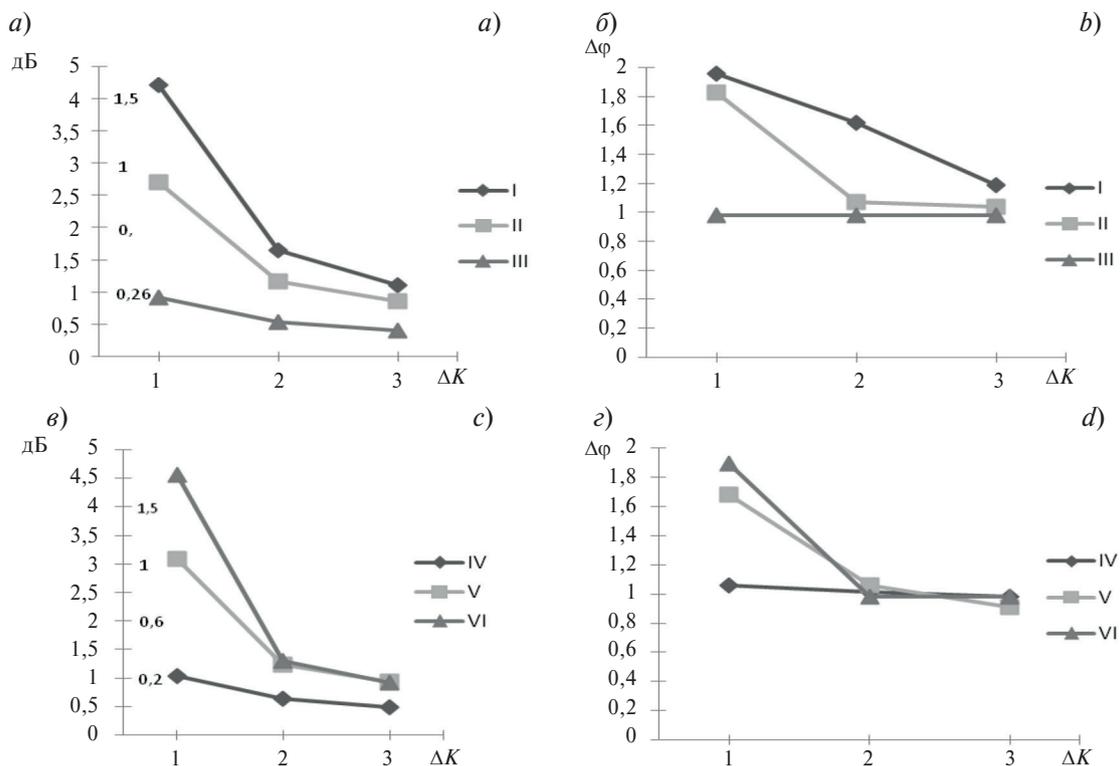


Рис. 5. Остаточный уровень рассеянного поля (a , ϑ) и область маскировки слабого источника (b , ε) в зависимости от числа корректируемых СЧ

Fig. 5. Residual level of the scattered field (a , c) and the masking area of the weak source (b , d) depending on the number of corrected eigenvalues

Угловое разрешение этого варианта (рис. 5, б) (область маскировки слабого источника) начинается с двух значений раствора характеристики направленности ($\Delta\varphi_0$) и уменьшается до 1,6 и 1,2 этого раствора при коррекции двух и трёх СЧ, соответственно. Ввиду большого ранга этого варианта адаптивной матрицы (4) улучшение результатов углового разрешения происходит медленно и даже при росте числа корректируемых СЧ до трёх не достигает минимума.

Второй вариант исходных данных имеет ранг адаптивной матрицы равный 2, что приводит к уменьшению (по сравнению с первым) исходного остаточного уровня до 2,7 дБ (0,86 от уровня фона) и уменьшению этого уровня до 1,17 дБ (0,309 от уровня фона) и 0,86 дБ (0,219 от уровня фона) при коррекции двух и трёх СЧ соответственно. Угловое разрешение этого варианта исходных данных улучшается до 1,83 раствора характеристики направленности и почти достигает минимума 1,07 и 1,05 при коррекции двух и трёх СЧ.

Третий вариант исходных данных позволяет сформировать адаптивную матрицу единичного ранга, что приводит к минимальным остаточным значениям рассеянных сигналов после коррекции только первого СЧ и практически стабильным оценкам углового разрешения после коррекции первого СЧ на уровне одного раствора ХН.

Варианты IV и V имеют такие же исходные данные, что и варианты III и II, но при более широкой области рассеяния мешающего сигнала (интервал пространственной корреляции уменьшен в два раза: вместо 33,86 он равен 16,9 элементов антенны). В итоге результаты экспериментов IV и V за счет стабильности ранга матриц по частоте практически повторяют результаты экспериментов III и II, несмотря на расширение области мешающего воздействия.

Вариант VI обеспечивает высокий уровень рассеянного сигнала 4,55 дБ (1,85 над уровнем фона) и зону потери контакта 1,89 относительно раствора ХН $\Delta\varphi_0$ при коррекции одного СЧ и практически достигает единицы при коррекции двух и трёх СЧ.

3. Заключение

Проведены модельные эксперименты по исследованию особенностей маскирующего действия интенсивных рассеянных мешающих сигналов на обнаружение и разрешение слабого сигнала. Осуществлена модельная имитация мешающего сигнала с известными параметрами, при приёме использован вариант «быстрых» проекционных алгоритмов с применением коротких выборок, отличающихся по частоте. Ограничение мощности сильных сигналов организовано путём коррекции нескольких старших СЧ адаптивной выборки. Приведены результаты шести экспериментов с различными вариантами параметров рассеянного сигнала.

Показано, что индикатором наличия рассеянной компоненты в сигнале источника является его траектория после коррекции одного СЧ, элементы которой характеризуются расширением пространственной области флюктуаций, что может использоваться как дополнительный признак для классификации источников.

Наличие рассеянной компоненты в мешающем сигнале приводит к расширению пространственной области маскировки слабого сигнала, усложняются методы снижения маскирующего эффекта, что связано с рангом матрицы искажений на интервале адаптации. При использовании коротких адаптивных выборок, отличающихся по частоте, уровень измеренного остаточного поля возрастает, если ранг матрицы искажений оказывается существенно больше единицы.

Для ослабления этого остаточного поля требуется коррекция нескольких СЧ. В этом случае при наличии нескольких мешающих сигналов необходимо увеличение числа корректируемых СЧ до двух и более для каждого источника. Если ранг матрицы искажений близок к единице, в пеленгационном рельефе наблюдается сильное ослабление мешающего действия рассеянного поля и сокращение зоны маскирующего действия интенсивных мешающих сигналов даже при коррекции одного СЧ на каждый источник.

Отметим перспективность для обнаружения и классификации сигналов соотношений типа (2) и (3), с помощью которого на выходе многоэлементных антенн становится возможным измерение параметров как когерентных, так и рассеянных компонент всех наблюдаемых гидроакустических источников, примеры которых приведены в представленной статье. Использование этих соотношений в сложных помеховых ситуациях значительно усложняется для измерения параметров каждого из всех наблюдаемых источников. Однако разработка технологии, основанной на использовании всей совокупности элементов входной выборки в элементах антенны, в пространственных каналах, в рабочем диапазоне частот, на интервале наблюдения позволят оценить параметры всех как когерентных, так и рассеянных составляющих, что позволит получить важную дополнительную информацию о параметрах каждого источника в конкретных условиях распространения наблюдаемых сигналов.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ проект № 23-29-00803.

Funding

The work was carried out with the support of the Russian Science Foundation grant project No. 23-29-00803.

Литература

1. Capon J. High resolution frequency-wavenumber spectral analysis // *Proceedings of the IEEE*. 1969. Vol. 57. P. 1408–1418. doi:10.1109/PROC.1969.7278
2. Schmidt R.O. Multiple emitter location and signal parameter estimation // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1986. Vol. AP_34, No. 3. P. 276–280. doi:10.1109/TAP.1986.1143830
3. Wang H., Kaveh M. Focusing matrices for coherent signal_subspace processing // *IEEE Transaction Acoustic, Speech and Signal Processing*. 1988. Vol. ASSP_36, No. 8, P. 1272–1281.
4. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2004. 199 с.
5. 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.
6. Малышкин Г.С. Экспериментальная проверка эффективности быстрых проекционных адаптивных алгоритмов // *Акустический журнал*. 2019. Т. 65, № 6. С. 828–847. doi:10.1134/S032079191906008X EDN: XAGYWC
7. Малышкин Г.С., Мельканович В.С. Классические и быстрые проекционные адаптивные алгоритмы в гидроакустике. С.-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2022. 266 с. EDN: DWCMU
8. 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 EDN: JDFRCG
9. Малышкин Г.С. Об одном методе классификации гидроакустических источников излучения на выходе адаптивной пространственной обработки // «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Труды Всероссийской конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 96–100. EDN: MAIRNB
10. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981, 416 с.
11. Лаваль Р., Лаваск И. Влияние неоднородностей и нестабильностей среды на пространственно-временную обработку сигналов // *Подводная акустика и обработка сигналов*. М.: Мир, 1983. С. 43–68.
12. Бреховских Л.М., Андреева И.Б. и др. Акустика океана. М.: Наука, 1974. 693 с.

References

1. Capon J. High resolution frequency-wavenumber spectral analysis. *Proceedings of the IEEE*. 1969;57:1408–18. doi:10.1109/PROC.1969.7278
2. Schmidt RO. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1986; AP-34(3):276–80. doi:10.1109/TAP.1986.1143830
3. Wang H, Kaveh M. Focusing matrices for coherent signal subspace processing. *IEEE Transactions on Acoustic, Speech and Signal Processing*. 1988; ASSP-36(8):1272–81.
4. Ratynskiy MV. *Adaptation and super resolution in antenna arrays*. Moscow: Radio i Svyaz; 2004. 199 p. (In Russian).
5. Cheremisyn OP, Ratynskiy MV, Komov AA, Pushin AE. Efficient projective algorithm for adaptive spatial filtering. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 1994;39(2):259–63. (In Russian).
6. Malyshkin GS. Experimental testing of the efficiency of fast projective adaptive algorithms. *Acoustical Physics*. 2019;65(6):749–64. doi:10.1134/S1063771019060071
7. Malyshkin GS, Melkanovich VS. *Classical and fast projective adaptive algorithms in hydroacoustics*. St. Petersburg: TsNIIMash Electrical Equipment; 2022. 266 p. (In Russian).
8. Malyshkin GS. 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 (In Russian).
9. Malyshkin GS. On a method for classifying hydroacoustic radiation sources at the output of adaptive spatial processing. In: *Proceedings of the All-Russian Conference «Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics»*. St. Petersburg: LEMA; 2023. p. 96–100. (In Russian).

Мальшкин Г.С.

Malyshkin G.S.

10. Shirman YD, Manjous VN. *Theory and techniques for processing radar information*. Moscow: Radio i Svyaz; 1981. 416 p.
11. Laval R, Lavask I. Influence of inhomogeneities and instabilities of the medium on spatial-temporal signal processing. In: *Underwater Acoustics and Signal Processing*. Moscow: Mir; 1983. p. 43–68.
12. Brekhovskikh LM, Andreeva IB, et al. *Ocean Acoustics*. Moscow: Nauka; 1974. 693 p.

Об авторе

МАЛЫШКИН Геннадий Николаевич, доктор технических наук, профессор АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», SPIN-код (РИНЦ): 2872-2146, e-mail: genstepmal@yandex.ru