

УДК 681.88

© Г. С. Малышкин, А. С. Кузнецова

ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург
genstepmal@yandex.ru

ОБНАРУЖЕНИЕ СЛАБЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СЛОЖНЫХ ПОМЕХОВЫХ СИТУАЦИЯХ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КЛАССИЧЕСКИХ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

Рассматривается задача оптимизации приемного тракта при обнаружении наиболее слабых локальных источников в присутствии более мощных локальных источников. Исходная классическая постановка задачи, предусматривающая спектральное разложение выборочной оценки корреляционной матрицы, дополняется коррекцией этой матрицы перед дальнейшим ее использованием по схеме аналогичной, например, алгоритму Кейпона. Коррекция оценки корреляционной матрицы проводится следующим образом: на основе анализа численных значений всех собственных чисел и анализа обстановки с помощью неадаптивных алгоритмов выявляется число $M1$ мешающих сигналов, создающих наиболее сильное маскирующее действие для слабых сигналов; осуществляется модификация $M1$ старших собственных чисел путем дозированного уменьшения их величины для ослабления мешающего действия. Далее откорректированная оценка корреляционной матрицы используется, например, по схеме алгоритма Кейпона, но с применением откорректированной матрицы вместо исходной. В результате формируется новый алгоритм, предназначенный для обнаружения наиболее слабых сигналов (CaponW, weak), а сильные сигналы присутствуют в его пеленгационных рельефах в ослабленном виде. Проведены модельные исследования применительно к помеховой ситуации из 14 сигналов, при этом сильные сигналы многолучевые и содержат значительную рассеянную компоненту. Результаты модельных исследований показали, что сравнение классического алгоритма Кейпона и модифицированного алгоритма CaponW (weak) показало существенное улучшение разрешающей способности алгоритма и сокращение времени потери контакта с целью.

Ключевые слова: алгоритм обнаружения гидроакустических сигналов, моделирование многолучевых и рассеянных сигналов, классический и модифицированный алгоритмы Кейпона.

G. S. Malyshkin, A. S. Kuznetsova

JSC «Concern CSRI Elektropribor», Saint-Petersburg, Russia

DETECTION OF WEAK SONAR SIGNALS IN HARSH NOISE CONDITIONS USING MODIFIED CLASSICAL ADAPTIVE ALGORITHMS

The paper considers optimization of receive path for the case of detecting weak local sources in the presence of stronger local sources. The initial classical problem statement based on spectral decomposition with sample estimate of correlation matrix is complemented with matrix correction before its future use using for example Capon algorithm. The estimate of correlation matrix is corrected as follows: based on analysis of numerical values of eigenvalues and analysis of situation using nonadaptive algorithms, the number $M1$ of interfering signals, which provide the most significant masking action on the weak signals is determined; $M1$ largest spectral numbers are modified by certain decreasing their values to mitigate the interfering action. Further, the corrected estimate of correlation matrix is used for example in Capon algorithm with corrected matrix used instead of initial one. As a result, a new algorithm is generated, intended for detection of weak signals (hereinafter referred to as CaponW, W meaning weak), with strong signals presents in its bearing plots in suppressed form. Simulation studies have been performed for the tactical situation with 14 signals, with strong signals being multipath and containing a significant dissipated component. Simulation has shown that the modified CaponW algorithm features better resolution and reduced contact loss time as compared with classical Capon algorithm.

Key words: direction of arrival algorithms, multipath signal propagation, signal scattering, Capon method.

Малышкин Г. С., Кузнецова А. С. Обнаружение слабых гидроакустических сигналов в сложных помеховых ситуациях на основе модифицированных классических адаптивных алгоритмов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 2. С. 73—80.

Malyshkin G. S., Kuznetsova A. S. Detection of Weak Sonar Signals in Harsh Noise Conditions Using Modified Classical Adaptive Algorithms. Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. 2016, 9, 2, 73—80.

При гидроакустическом шумопеленговании особенно сложной является задача обнаружения и оценки параметров наиболее слабых сигналов в сложных помеховых ситуациях, т. е. при одновременном воздействии на приемный тракт большого числа достаточно сильных посторонних источников, маскирующих наиболее слабые сигналы.

Для обнаружения и оценки сигналов широко используются и анализируются адаптивные алгоритмы [1—3], однако в известной автору литературе отсутствуют источники, которые в прямой постановке анализировали бы вопрос об улучшении обнаружения-разрешения самых слабых сигналов из совокупности всех сигналов, присутствующих на элементах антенны в условиях, характерных для режима шумопеленгования.

Эта задача усложняется тем, что гидроакустическое наблюдение ведется в широком диапазоне частот при большом числе физических [4, 5] и технических мешающих факторов [6], для обнаружения используются выборки большого объема, а слабые сигналы должны обнаруживаться при весьма малых отношениях сигнал/помеха. Механизм мешающего действия более сильных мешающих сигналов по отношению к самым слабым сигналам в режиме шумопеленгования проявляется в двух формах: общешумовое или локальное маскирующее действие.

Общешумовое мешающее действие проявляется в увеличении шумового фона, обусловленного воздействием более сильного источника по боковым лепесткам характеристики направленности, что приводит к снижению отношения сигнал/помеха в направлении наблюдения. Снижение общешумового маскирующего действия достигается либо снижением бокового поля при формировании характеристик направленности посредством введения соответствующих весовых коэффициентов (что сопровождается расширением основного лепестка и, следовательно, области локального маскирующего действия), либо использованием адаптивных алгоритмов (например, алгоритма Кейпона), уменьшающих уровень бокового поля при формировании пеленгационного рельефа.

Локальное маскирующее действие проявляется в необходимости «разрешения» каждого из присутствующих сигналов (в особенности самого слабого), что требует получения отдельной отметки, фиксирующей факт наличия каждого сигнала. Обычно при анализе разрешающей способности присутствие отдельного сигнала фиксируется по наличию провала (1—3) дБ между отметками сигналов. Однако в режиме шумопеленгования, где обнаруживаемые сигналы имеют уровень до –20 дБ над уровнем шумового фона, такие алгоритмы нереализуемы. В сложных помеховых ситуациях гидроакустики формируется анизотропный фон, при котором решение о наличии каждого сигнала принимается либо после стабилизации фона (например, с помощью медианной фильтрации), либо с использованием методов пространственного контраста.

Уменьшение области локального маскирующего воздействия предлагалось выполнить с помощью нормирования [7] или контролируемого нормирования сильных сигналов [8, 9], что позволяло частично решать эту задачу применительно к конкретным модификациям известных адаптивных алгоритмов при использовании достаточно сложной системы коэффициентов, настройка которых возможна после тщательного анализа параметров конкретной помеховой ситуации.

Указанные обстоятельства ставят вопрос о более широкой постановке задачи оптимизации обработки в приемном тракте, ориентированной на обнаружение самых слабых сигналов в присутствии многих других, более сильных сигналов на элементах приемной антенны. Целью такой оптимизации является как повышение эффективности при обнаружении самых слабых сигналов, так и получение более простого и надежного метода управления формированием необходимых весовых коэффициентов, обеспечивающих такую оптимизацию. Точное решение такой задачи затруднено ввиду сложности формулирования количественного критерия оптимальности при принятии решения об обнаружении сигнала с использованием методов пространственного контраста. Однако, ориентируясь на анализ физических процессов в различных (как адаптивных, так и неадаптивных) вариантах приемных трактов, попытаемся определить наиболее благоприятные условия разрешения самых слабых сигналов в присутствии других, более мощных источников.

Формирование модифицированного адаптивного алгоритма. Рассмотрим организацию вычислительного процесса при приеме сигналов L элементной антенной решетки после проведения спектрального анализа в ее элементах. Сформируем участок входной выборки, на котором выполняется полный цикл формирования адаптивного приема. По результатам этого цикла строится пеленгационный

рельеф, с помощью которого можно принять первичное решение об обнаружении присутствующих сигналов и оценке направлений на них.

Участок входной выборки для формирования одного пеленгационного рельефа состоит из $1 \dots n \dots N$ спектральных отсчетов на $1 \dots t \dots T$ последовательных интервалах спектрального анализа, элементами выборки являются вектора столбцы размерности L $X(n, t)$, которые определяют выборку n -го спектрального отсчета в элементах антенны на t -м интервале спектрального анализа. Спектральные отсчеты разбиты на $1 \dots r \dots N_1$

$$N_1 = \frac{N}{K} \quad (1)$$

частотных групп (адаптивных поддиапазонов) по $1 \dots k \dots K$ спектральных отсчетов в каждой, согласно соотношению (1).

В каждой из r частотных групп на $1 \dots t \dots T$ интервалах спектрального анализа формируется адаптивная входная выборка, с помощью которой осуществляются процедуры адаптивной обработки.

Адаптивная выборка $\mathbf{X}_r(\Sigma T)$ с номером r состоит из $1 \dots t \dots T$ частных матриц $\mathbf{X}_r(t)$ размерности $L \times K$

$$\mathbf{X}_r(\Sigma T) = \mathbf{X}_r(1) \dots \mathbf{X}_r(t) \dots \mathbf{X}_r(T) \quad (2)$$

каждая адаптивная выборка в $1 \dots r \dots N_1$ частотных группах состоит из $T \times K$ векторов-столбцов размерности L . Размерность адаптивной группы, согласно (2), определяется видом используемого адаптивного алгоритма, так, например, для рассматриваемых классических адаптивных алгоритмов, использующих выборочную оценку корреляционной матрицы объем выборки при обнаружении слабых сигналов должен быть не менее $4L$, так как при меньших объемах выборки собственные числа самых слабых сигналов еще не успевают сформироваться. Все адаптивные группы проводят независимую параллельную обработку в пределах каждой группы для одного и того же комплекта пространственных каналов с последующим накоплением частных результатов, полученных внутри каждой группы. Сигналы с разными номерами спектральных отсчетов внутри каждой группы подвергаются фокусировке [3], или, при достаточно узкой полосе частот, возможно использование спектральных отсчетов без предварительной операции фокусировки при допустимом снижении эффективности обнаружения. Сочетание временных и частотных элементов обусловлено необходимостью получения выборки необходимого объема на интервале, где помеховую ситуацию можно считать стационарной. Следующий пеленгационный рельеф формируется после смещения входной выборки по времени на один или несколько интервалов спектрального анализа.

Классические алгоритмы оперируют с выборочной оценкой корреляционной матрицы вида:

$$\overline{Q(r, T)} = \frac{1}{TK} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \mathbf{X}_r(t) \mathbf{X}_r^{*T}(t), \quad (3)$$

где k определяет суммирование по номерам спектральных отсчетов, а t — по интервалам спектрального анализа.

Выборочная оценка корреляционной матрицы (3) является достаточной статистикой входной выборки на интервале адаптации, состоящем из группы частотных и временных отсчетов. В режиме шумопеленгования решение об обнаружении присутствующих сигналов принимается в результате накопления результатов обработки большого числа адаптивных групп входной выборки типа (3), различающихся либо номерами частотных отсчетов, либо номерами интервалов спектрального анализа. Однако вид обработки собственных чисел и собственных векторов внутри каждой адаптивной группы определяет конкретный вариант адаптации. Поэтому, при дальнейшем рассмотрении, сосредоточимся вначале на особенностях обработки одной адаптивной группы, сформулируем направления ее модификации, а затем, при анализе модельных результатов приведем результаты совместной модификации всех адаптивных групп, разнесенных как по частотам, так и по времени, формирующих всю входную выборку на последовательных интервалах наблюдения.

Спектральное разложение выборочной корреляционной матрицы (3) представляется в виде

$$\overline{Q(r, T)} = \sum_{l=1}^L \sigma_{lr}^2 \mathbf{U}_{lr} \mathbf{U}_{lr}^{*T}, \quad (4)$$

где σ_{lr}^2 и $\mathbf{U}_{lr}$ — выборочные значения собственных чисел и собственных векторов ($1 \dots l \dots L$), полученные в результате обработки сигналов r -й адаптивной группы.

В соотношении (4) старшие собственные числа и собственные векторы характеризуют энергетические и структурные параметры наиболее сильных сигналов, а последующие содержат информацию о более слабых сигналах и помехах. Отметим, что собственные векторы наиболее сильных сигналов сохраняют информацию об их структуре на элементах антенны с учетом ортогонализации, учитывающей взаимное влияние близких источников. Поэтому эта информация является наиболее ценной и не случайно многие классические адаптивные алгоритмы (например, MUSIC [2]) используют информацию только в виде собственных векторов и прямо не используют информацию о собственных числах выборочной оценки корреляционной матрицы, которая зависит от интенсивностей принимаемых сигналов. Применительно к нашей задаче будем определять модифицированную конфигурацию собственных чисел, создающих благоприятные условия для обнаружения наиболее слабых сигналов, но при сохранении неизменной информации о структуре собственных векторов.

Пусть в составе входной смеси $1 \dots M_1$ наиболее сильных сигналов оказывают наиболее сильное мешающее действие при обнаружении слабых сигналов. Дальнейшая задача, с одной стороны, заключается в ослаблении влияния на пеленгационные рельефы наиболее сильных сигналов, но таким образом, чтобы не вызвать их искажение, связанное с подавлением амплитуд сильных сигналов. Простейшим вариантом такой коррекции является сделать первые M_1 собственных чисел, больших, чем собственное число последнего из сильных сигналов (M_1 -го), равными этому числу.

Веса собственных векторов с номерами от $M_1 + 1$ до L в исходном соотношении (4), полагаем соответствующим их оптимальному взвешиванию при обнаружении слабых сигналов. В итоге для обнаружения слабых сигналов необходимо сформировать модифицированную оценку выборочной оценки корреляционной матрицы, ориентированную на обнаружение наиболее слабых сигналов

$$\overline{\mathbf{Q}}_m(r, T) = \sum_{r=1}^L \sigma_{mlr}^2 \mathbf{U}_{lr} \mathbf{U}_{lr}^{*T}, \quad (5)$$

где $\overline{\mathbf{Q}}_m(r, T)$ — модифицированная выборочная оценка корреляционной матрицы; σ_{mlr}^2 — модифицированный набор собственных чисел, сформированных с целевой задачей обеспечить в адаптивном алгоритме благоприятные условия для обнаружения и оценки параметров, наиболее слабых из присутствующих сигналов. Отметим, что в соотношении (5) собственные вектора матрицы $\mathbf{U}_{lr}$ те же самые, что и в соотношении (4). Используя такую модифицированную оценку корреляционной матрицы при формировании схемы, типичной, например, для алгоритма Кейпона [1], получим алгоритм обработки сигналов r -й группы, который должен обеспечить более благоприятные условия для обнаружения наиболее слабых сигналов

$$S_{ijm} = \frac{1}{\mathbf{V}_{jr}^{*T} \overline{\mathbf{Q}}_m(r, T)^{-1} \mathbf{V}_{jr}}. \quad (6)$$

В соотношении (6) исходная обращенная выборочная корреляционная матрица (4) заменена модифицированным аналогом с измененными собственными числами, но сохраненными собственными векторами (5), а перебор по $1 \dots j \dots J$ направлениям наблюдения позволяет построить пеленгационный рельеф, предназначенный для обнаружения слабых сигналов. Обнаружение и оценка параметров сильных сигналов обеспечивается классическим вариантом алгоритма Кейпона, использующим при обработке выборочную оценку корреляционной матрицы (4). Таким образом, синтезированный алгоритм выполняет функцию дополнительного обнаружения более слабых сигналов, не обнаруженных классической версией алгоритма.

Обсудим далее соображения, которыми следует руководствоваться при выборе конкретного варианта модификации соотношения (5). При обсуждении этого вопроса приходится считаться с особенностями гидроакустических сигналов в сложных помеховых ситуациях. С учетом многолучевого характера, наличия сильного рассеяния принимаемых колебаний, анизотропии естественного фона, а также наличия технических факторов (случайные ошибки формирования весовых коэффициентов, ограниченный интервал спектрального анализа и др.) [8, 9] обнаружение слабых гидроакустических сигналов происходит на фоне мощного анизотропного фона. В таких ситуациях только алгоритмы обработки

пеленгационных рельефов, основанные на методах двустороннего пространственного контраста [10], обеспечивают практически приемлемые результаты при обнаружении наиболее слабых сигналов. В связи с этим простое вычитание из спектрального разложения (5) наиболее сильных составляющих, инициированных наиболее сильными сигналами, приводит к появлению ложных трасс, выявляемых методом пространственного контраста. Поэтому должны использоваться методы дозированного ослабления наиболее сильных сигналов, улучшающие условия обнаружения слабых сигналов, но не создающие глубоких проколов в пеленгационных рельефах, формирующих ложные трассы при обработке контрастными алгоритмами. Таким образом, задача модификации в соотношении (6) заключается в том, чтобы максимально ослабить наиболее сильные сигналы, однако сохранить их дозированное присутствие, при отсутствии искажений в формируемых пеленгационных рельефах, обусловленных ослаблением вклада наиболее сильных сигналов.

Пример возможной модификации собственных чисел выборочной корреляционной матрицы приведен на рис. 1, на котором кривой 1 (в децибелах) представлено исходное распределение собственных чисел выборочной корреляционной матрицы, полученной на 96 элементной линейной антенне. Как видно из рис. 1, общий диапазон изменения собственных чисел от 22 до -5 дБ, по результатам анализа распределения собственных чисел определено, что модификации подлежат 14 старших собственных чисел. Кривыми 2 и 3 представлено 2 варианта модификации исходного распределения собственных чисел. В первом случае все старшие собственные числа приравнены значению младшего собственного числа из выбранных 14 старших, а во втором случае уровни модифицированных собственных чисел уменьшены еще на 2 дБ. Все собственные числа с номерами больше 14 после модификации остались неизменными во всех вариантах распределения собственных чисел, что гарантирует сохранение исходных энергетических соотношений между слабыми сигналами и помеховым фоном. Назовем последний алгоритм CaponW, чтобы подчеркнуть его ориентацию на обнаружение самых слабых из совокупности присутствующих сигналов (weak). Достоинством рассматриваемого алгоритма является простота, единственным регулируемым его параметром является M_1 — приближенно определяемое число достаточно интенсивных источников, собственные числа которых подлежат корректировке, что легко устанавливается по характеру наблюдаемой помеховой ситуации как точка перехода от резкого спада к плавному уменьшению собственных чисел. Конечно, конкретные параметры и пороги рассматриваемой модификации алгоритма могут изменяться в зависимости от конкретных особенностей конкретного средства, однако дозированное уменьшение численного значения старших собственных чисел обеспечивает простое и надежное ослабление маскирующего действия наиболее сильных сигналов.

Модельные исследования. Дальнейший анализ заключается в модельном сравнении классического алгоритма Кейпона и его рассмотренного модифицированного варианта в сложной помеховой ситуации. В широком диапазоне частот аналогичной обработке подвергаются и накапливаются сигналы всех адаптивных групп, строится общий пеленгационный рельеф, и трассы всех сигналов выявляются в нем с помощью алгоритмов, основанных на применении алгоритмов двустороннего пространственного контраста.

Рассмотрим далее результаты модельных исследований. Характер и параметры типовой помеховой ситуации представлены на рис. 2.

На линейную эквидистантную антенну из 96 элементов воздействуют 14 сигналов, характер перемещения которых в пространстве определяется рис. 2. Общее время наблюдения включает 1200 временных интервалов спектрального анализа, на каждом из которых используется 2257 спектральных отсчетов в полосе с отношением верхней частоты к нижней 1.52. На среднеарифметической частоте используемого диапазона волновой размер антенны составлял 44.8.

Особенностью рассматриваемой помеховой ситуации является ее сложность за счет большого числа источников, большого разнообразия соотношений

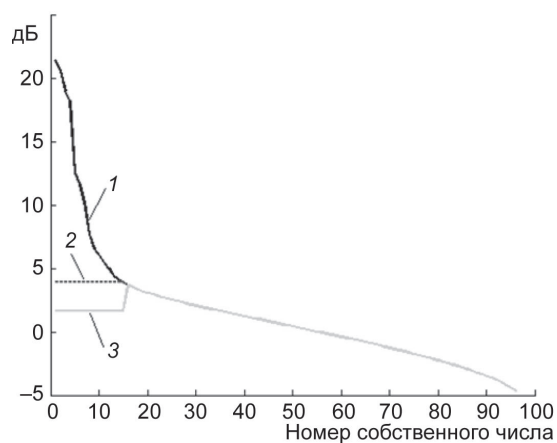


Рис. 1. Модификация собственных чисел.
1 — исходное распределение собственных чисел;
2, 3 — модификации распределения.

интенсивностей, когерентных и рассеянных составляющих между источниками, наличия пересечений трасс с различными взаимными интенсивностями. В целом рассматриваемая ситуация характеризуется четырьмя уровнями сигналов. Четыре самых сильных многолучевых сигнала (яркие линии) имеют интенсивность сигнала каждого луча на элементах антенны от 0 до -3 дБ. Следующие четыре сигнала имеют интенсивности на порядок ниже (от -10 до -13 дБ, тонкие линии), следующие два сигнала имеют интенсивности еще на порядок ниже (пунктирные линии, от -20 до -23 дБ) и четыре самых слабых сигнала имеют интенсивности в среднем -30 дБ (точечные линии) по отношению к наиболее сильным сигналам. Коэффициенты когерентности сильных и средних сигналов равны 0.72, интервалы временной корреляции флуктуаций ~5 интервалов спектрального анализа, интервал частотной корреляции флуктуаций на уровне 0.6 ~35 частотных отсчетов, интервал пространственной корреляции 10—20 расстояний между элементами антенны. В публикациях [4—5] подробно проанализирован эффект маскирующего действия условий многолучевого распространения и рассеяния сильных сигналов при обнаружении слабых сигналов адаптивными методами. Усиление маскирующего действия этих явлений обусловлено внесением части энергии сильных сигналов в направление наблюдения и увеличением числа мешающих факторов при длительном накоплении выборочных оценок корреляционных матриц. В результате характеристики адаптивных алгоритмов по разрешению слабых сигналов существенно ухудшаются.

Адаптация проводилась в 61 адаптивном поддиапазоне из 37 спектральных отсчетов каждый, корреляционная матрица формировалась на $T = 12$ последовательных интервалах спектрального анализа, так что объем адаптивной выборки составлял 444 при 96 элементной антенне, что удовлетворяет требованию более $4L$.

Дальнейшие исследования заключаются в оценке пеленгационных рельефов и выявленных трасс всех сигналов с использованием классического алгоритма Кейпона, а также его модификации CaponW.

Пеленгационные рельефы строились с использованием 271 пространственных направлений наблюдения (пространственных каналов). На рис. 3 представлены сечения пеленгационных рельефов в децибелах по отношению к уровню фона (алгоритм Кейпона — *а*) и алгоритм CaponW — *б*) на 12 интервале спектрального анализа. Из анализа рис. 3, *а* следует, что для классического алгоритма Кейпона мощные отметки самых сильных сигналов (даже в логарифмическом масштабе) доминируют в пеленгационном рельефе. Отметки более слабых сигналов носят характер мелких деталей, что определяет трудность их обнаружения контрастными алгоритмами.

Напротив, в модифицированном алгоритме (рис. 3, *б*), после резкого ослабления отметок сильных сигналов, рельефно выделяются отметки, как самых слабых сигналов, так и сигналов средней интенсивности. Это позволяет произвести их надежную фиксацию с помощью алгоритмов, основанных на двустороннем пространственном контрасте. Анализ рис. 3 также показывает, что обнаружение сигналов, с энергией в тысячи раз меньше энергии близких мощных сигналов, сопряжено с большими сложностями их выделения (в особенности автоматического) на непрогнозируемом анизотропном фоне, обусловленном остатками подавленных сигналов и его флуктуациями.

На рис. 4 представлены трассы, выделенные после обработки пеленгационных рельефов, с периодом 2 интервала спектрального анализа. Яркими линиями представлены трассы сигналов, обнаруженные классическим алгоритмом Кейпона, а серыми линиями кривые, дополнительно выявленные алгоритмом CaponW. Результаты сравнения алгоритмов свидетельствуют о том, что модифицированный алгоритм позволяет обнаружить значительные участки трасс, которые не обнаруживаются классической версией алгоритма. Отметим, что алгоритм Кейпона обеспечивает надежное обнаружение значительных участков трасс сильных и средних сигналов, при этом выявляется двухлучевой характер сигналов, проходящих под значительным углом к нормали антенны.

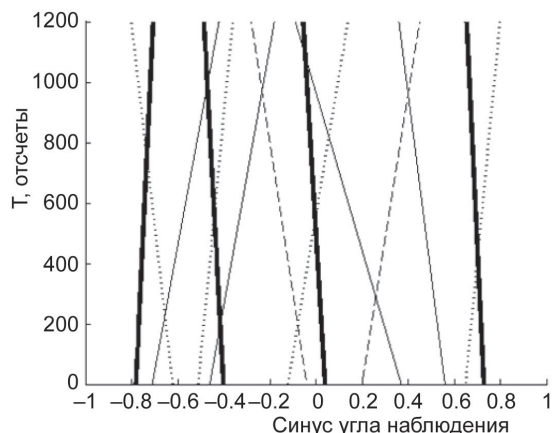


Рис. 2. Взаимное положение источников и их перемещение в процессе наблюдения.

Наибольшие потери контакта со слабой целью происходят в районе нулевых значений синуса угла наблюдения, где трасса слабой цели пересекает трассы трех более сильных источников.

Еще большие дополнительные участки трасс позволяет выявить модифицированный алгоритм по сравнению с неадаптивным алгоритмом Бартлетта, что представлено на рис. 5.

Как следует из анализа рис. 5, алгоритмом Бартлетта обнаруживаются только небольшие участки трасс самых слабых сигналов, надежно обнаруживаются только наиболее сильные сигналы и сигналы средней интенсивности. Модифицированный алгоритм позволяет выявить большие участки трасс самых слабых сигналов и улучшить разрешение сигналов средней интенсивности.

Возможности классических адаптивных алгоритмов в значительной степени связаны с необходимостью формирования выборки большого объема, что приводит к усреднению рассеянных компонент и усилению их мешающего влияния. Конкурирующим вариантом при обнаружении слабых сигналов является применение быстрых проекционных алгоритмов, которые могут иметь ряд преимуществ по сравнению с классическими. Поэтому важным направлением дальнейших исследований является сравнительное сопоставление этих вариантов по совокупности параметров, определяющих эффективность и простоту реализации.

В целом предлагаемый алгоритм CaponW прост в настройке, более эффективен, чем сложные при реализации алгоритмы с контролируемым нормированием сильных сигналов и позволяет существенно улучшить разрешение наиболее слабых сигналов. Это обусловлено тем, что сильные сигналы резко ослабляются при обработке, их маскирующее действие ограничено, но благодаря разумной дозировке этого ослабления улучшение условий обнаружения-разрешения самых слабых сигналов происходит без внесения нежелательных искажений в анализируемые пеленгационные рельефы.

Изложенное свидетельствует, что применение адаптивных алгоритмов для решения задач гидроакустики является специфичным. Для решения ее задач эффективными оказываются новые модификации известных алгоритмов, либо новый класс быстрых проекционных алгоритмов, позволяющий использовать конкретные особенности физики акустических процессов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-08-02907\16).

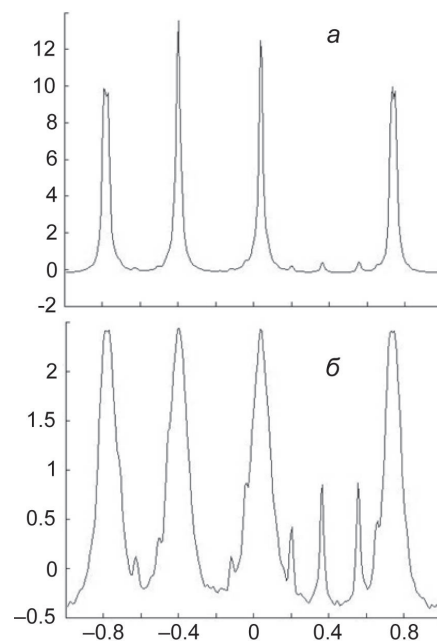


Рис. 3. Пеленгационные рельефы алгоритмов.
а — Кейпон; б — CaponW.

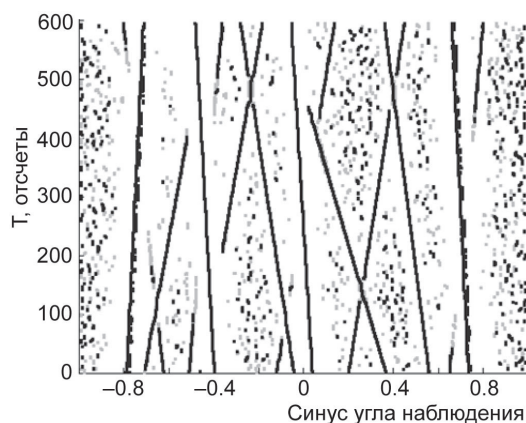


Рис. 4. Трассы сигналов, выделенные алгоритмом Кейпона (яркие линии) и алгоритмом CaponW (серые линии).

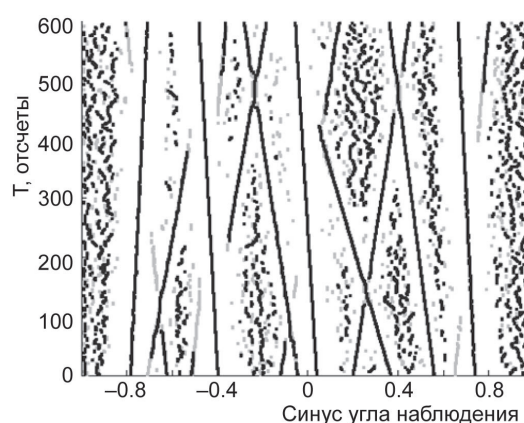


Рис. 5. Трассы сигналов, выявленные алгоритмом Бартлетта (яркие линии) и алгоритмом CaponW (серые линии).

Литература

1. *Capon J.* High resolution frequency-wavenumber spectral analysis // *Proc. IEEE*. 1969. V. 57. P. 1408—1418.
2. *Schmidt R. O.* Multiple emitter location and signal parameter estimation // *IEEE Trans.* 1986. V. AP_34, № 3. P. 276—280.
3. *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.
4. Мальшикин Г. С. Анализ влияния физических и технических факторов на эффективность адаптивных алгоритмов обработки гидроакустических сигналов // *Акуст. журн.* 2014. Т. 60, № 3. С. 284—299.
5. Мальшикин Г. С. Влияние рассеяния сильных мешающих гидроакустических сигналов на эффективность адаптивных алгоритмов при разрешении слабых сигналов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013. Т. 6, № 1. С. 78—89.
6. Мальшикин Г. С., Шафранюк Ю. В. Адаптивный прием плосковолновых широкополосных сигналов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013. Т. 6, № 1. С. 66—77.
7. Мальшикин Г. С., Мельканович В. С. Адаптивные алгоритмы для обнаружения и оценки параметров слабых сигналов в режиме шумопеленгования при наличии сильных мешающих источников звука // *Успехи современ. радиоэлектроники*. 2009. № 12. С. 32—45.
8. Мальшикин Г. С., Сидельников Г. Б. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов (обзор) // *Акустический журнал*. 2014. Т. 60, № 5. С. 526—545.
9. Мальшикин Г. С., Сидельников Г. Б. Анализ функционирования классических адаптивных алгоритмов в условиях многолучевого распространения и рассеяния. Направления их модификации // *Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб.: Нестор-История, 2014. С. 377—380.
10. Белецкий Ю. С. Методы и алгоритмы контрастного обнаружения сигналов на фоне помех с априори неизвестными характеристиками. М.: Радиотехника, 2011. 429 с.

Статья поступила в редакцию 03.02.2015 г.