

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПОИСКЕ МАЛОШУМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО СУДОХОДСТВА

© 2024 г. А. И. Машошин^а, *, В. С. Мельканович^а

^аАО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор", ул. Малая Посадская 30, Санкт-Петербург, 197046 Россия

*e-mail: aimashoshin@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2023 г.

После доработки 14.02.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Описана методика и приводятся результаты модельной количественной оценки эффективности решения задачи обнаружения и отслеживания малошумного подводного объекта с применением трех алгоритмов пространственной обработки сигналов на выходе многоэлементной антенны — неадаптивного алгоритма Бартлетта, алгоритма Кейпона, а также алгоритма Кейпона, совмещенного с проекционной процедурой ограничения мощности сигналов сильных локальных источников.

Ключевые слова: гидроакустика, многоэлементная антенна, пространственная обработка, адаптивные алгоритмы, ортогональный проектор, моделирование

DOI: 10.31857/S0320791924030098 **EDN:** ZLYEMI

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений развития гидроакустики является повышение помехоустойчивости и разрешающей способности режимов шумопеленгования гидроакустических комплексов за счет применения адаптивных алгоритмов пространственной обработки сигналов на выходе многоэлементных антенн. Разработке таких алгоритмов на протяжении последних 50–70 лет посвящено большое число публикаций, например, [1–12]. В работах [13–17] приведены обзоры адаптивных алгоритмов. Многие из известных адаптивных алгоритмов используются на практике.

В отличие от неадаптивного алгоритма (алгоритма Бартлетта), заключающегося в компенсации многоэлементной антенны в заданном направлении без учета поля помех, адаптивные алгоритмы базируются на использовании выборочных оценок спектральных корреляционных матриц, содержащих информацию о направлении прихода и спектральном составе полезного сигнала и помех, что позволяет подавить помехи, тем самым улучшая условия наблюдения полезного сигнала.

Все адаптивные алгоритмы пространственной обработки можно условно разделить на две группы. К первой группе принадлежат так называемые

«классические» (по терминологии автора работы [16]) адаптивные алгоритмы (Андерсена, Джонсона, Кейпона, Шмидта, Борджотти–Лагунаса и др.), появившиеся во второй половине прошлого столетия. Однако их практическая реализация выявила ряд существенных недостатков, к которым в частности относятся:

- классические алгоритмы базируются на гипотезе полной когерентности сигналов, не учитывая наличие рассеянной компоненты, ввиду чего их реальная помехоустойчивость при обнаружении слабых сигналов уступает теоретической;
- реализация классических алгоритмов базируется на операциях с корреляционными матрицами большой размерности, что выдвигает высокие требования к производительности и объему оперативной памяти вычислителя.
- необходимое время накопления корреляционных матриц входных сигналов, являющихся основой реализации адаптивных алгоритмов, линейно зависит от их размерности и, как правило, существенно превышает интервалы пространственно-временной стационарности сигналов и помех, что приводит к расширению пространственного спектра помех и, как

следствие, к снижению помехоустойчивости обнаружения слабых сигналов, представляющих наибольший интерес.

Устранение перечисленных недостатков явилось главной мотивацией разработки нового поколения адаптивных алгоритмов [18–23], которые их авторами названы быстрыми проекционными. В основу этих алгоритмов положена гипотеза (которая впоследствии нашла экспериментальное подтверждение) о возможности повышения помехоустойчивости адаптивных алгоритмов за счет использования пространственно-частотной когерентности искажений акустического поля, порожденных рассеянием сильных сигналов. При этом было показано, что интервалы временной когерентности рассеянных сигналов составляют доли секунд, откуда следовало, что для подавления мощных локальных помех адаптивные алгоритмы должны базироваться на выборках предельно малого размера. Это, в свою очередь, позволяет распространить область применения адаптивных процедур на подавление импульсных помех применительно как к пассивным, так и к активным режимам работы гидроакустической аппаратуры.

Важной особенностью быстрых проекционных алгоритмов является также включение в них процедуры контролируемого ослабления (ограничения мощности) сильных сигналов. Процедура ограничения мощности обеспечивает выравнивание в пеленгационных рельефах уровней откликов сигналов локальных источников (ЛИ), что создает предпочтительные условия для обнаружения слабых сигналов.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных адаптивным алгоритмам пространственной обработки, с трудом можно найти работы, в которых была бы приведена количественная оценка эффективности этих алгоритмов. Как правило, авторы демонстрируют эффект на нескольких (зачастую на одном) конкретных примерах. Поскольку адаптивные алгоритмы требуют более высоких характеристик реализующих их вычислительных средств, при их внедрении в гидроакустическую аппаратуру возникает вопрос о том, какой количественный показатель качества работы аппаратуры повысится при их внедрении, в каких условиях и на какую величину. Работа, результаты которой представлены в предлагаемой статье, преследует цель частично восполнить этот пробел и предложить вариант методики количественной оценки эффективности различных алгоритмов пространственной обработки при обнаружении

слабо шумящих источников в условиях надводного судоходства различной плотности.

Работа выполнялась путем сравнительного моделирования в однотипных условиях трех алгоритмов пространственной обработки – неадаптивного алгоритма Бартлетта и адаптивного алгоритма Кейпона в классической версии и в версии предварительного применения процедуры контролируемого ограничения мощности сильных сигналов.

В качестве показателей эффективности при моделировании вычислялись средние значения:

- дистанции обнаружения подводного объекта (ПО);
- времени наблюдения ПО с момента его обнаружения до момента окончательной потери с ним акустического контакта.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРУЕМЫХ АЛГОРИТМОВ

Как отмечено выше, для сравнения были выбраны 3 алгоритма:

- неадаптивный алгоритм Бартлетта как база для сопоставления и одновременно как один из обязательных алгоритмов пространственной обработки в режимах шумопеленгования всех гидроакустических комплексов [15, 16];
- алгоритм Кейпона, реализуемый в пространстве сформированных пространственных каналов, являющийся практически стандартом классических адаптивных алгоритмов для многоэлементных антенных решеток [3, 7, 9, 14];
- алгоритм Кейпона с контролируемым ограничением выходной мощности сигналов сильных ЛИ, относящийся к быстрым проекционным алгоритмам [23].

Алгоритм Кейпона обладает свойством сверхразрешения, т.е. его применение обеспечивает сужение отметок сильных ЛИ в пеленгационном рельефе. Причем сужение отметки проявляется тем сильнее, чем больше отношение уровня ЛИ к уровню распределенной помехи (будем называть его отношением сигнал/шум — ОСШ). На практике для проявления эффекта сужения необходимо, чтобы ОСШ на выходе линейной части приемного тракта составляло не менее 0 дБ [16]. Для сигналов меньшего уровня отклики алгоритма Кейпона и неадаптивного алгоритма практически одинаковы. Вместе с тем, даже при максимальном сужении отметки сильных ЛИ ее ширина

на уровне распределенной помехи составляет 2–3 ширины характеристики направленности антенной решетки, что препятствует обнаружению близко расположенных к ЛИ слабых сигналов. Алгоритм Кейпона с контролируемым ограничением выходной мощности сигналов сильных ЛИ призван устранить этот недостаток.

Приводимые ниже выражения заимствованы из [16, 23].

Выходом пространственной обработки, реализуемой в режиме шумопеленгования на каждом временном интервале обработки входных сигналов, является так называемый пеленгационный рельеф, определяемый в виде

$$PR(\alpha_g, \psi_v) = \int_{f_1}^{f_2} H(f) S_{\text{out}}(f, \alpha_g, \psi_v, F) df, \quad (1)$$

где $PR(\alpha_g, \psi_v)$ — уровень сигнала на индикаторе режима шумопеленгования при компенсации антенны по курсовому углу (пеленгу) α_g и углу места ψ_v ; f_1, f_2 — нижняя и верхняя граничные частоты рабочего диапазона частот; $H(f)$ — частотный фильтр, в частности фильтр Эккарта, максимизирующий ОСШ при приеме широкополосного сигнала [16]; $S_{\text{out}}(f, \alpha_g, \psi_v)$ — энергетический спектр смеси сигналов ЛИ и распределенной помехи в направлении (α_g, ψ_v) , полученный в результате пространственной обработки.

На начальном этапе пространственной обработки выполняется формирование в секторе обзора веера неадаптивных пространственных каналов (ПК) согласно алгоритму Бартлетта с угловым шагом, равным или меньшим ширины характеристики направленности антенны.

На следующем этапе — этапе реализации адаптивных алгоритмов по выходу сформированных ПК — в окрестности каждого из «осветляемых» направлений (α_g, ψ_v) выбирается нечетное количество N сформированных ПК, ближайших к освещаемому каналу и симметрично расположенных относительно него. Будем называть выбранные каналы базовыми ПК для канала, сформированного в направлении (α_g, ψ_v) . Значения комплексных спектральных отсчетов по выходу этих каналов на K смежных интервалах спектрального анализа составляют обучающую выборку адаптивной процедуры.

Оценка спектральной корреляционной матрицы (КМ) $\mathbf{R}(f, \alpha_g, \psi_v)$ размерности $N \times N$ смеси сигналов ЛИ и распределенной помехи для

базовых ПК, соответствующих направлению наблюдения (α_g, ψ_v) , вычисляется как

$$\mathbf{R}(f, \alpha_g, \psi_v) = \overline{\mathbf{G}(f, \alpha_g, \psi_v) \mathbf{G}^*(f, \alpha_g, \psi_v)}, \quad (2)$$

где $\mathbf{G}(f, \alpha_g, \psi_v)$ — вектор-столбец размерности N комплексных спектров смеси сигналов ЛИ и распределенной помехи, вычисленных на одном из K циклов спектрального анализа на выходе базовых для направления (α_g, ψ_v) ПК. Горизонтальная черта в правой части (2) символизирует осреднение по K циклам спектрального анализа, * — знак эрмитова сопряжения.

В случае алгоритма Бартлетта энергетический спектр смеси сигналов ЛИ и распределенной помехи $S_{\text{out}}(f, \alpha_g, \psi_v)$ равен центральному элементу КМ $\mathbf{R}(f, \alpha_g, \psi_v)$.

Большинство адаптивных алгоритмов пространственной обработки имеют идентичную структуру, определяемую в виде

$$S_{\text{out}}(f, \alpha_g, \psi_v) = \mathbf{V}^*(f, \alpha_g, \psi_v) \mathbf{R}(f) \mathbf{V}(f, \alpha_g, \psi_v), \quad (3)$$

где $\mathbf{V}(f, \alpha_g, \psi_v)$ — управляющий вектор-столбец размерности N , называемый также вектором адаптивных весовых коэффициентов, обеспечивающий формирование соответствующего адаптивного приемного канала в направлении (α_g, ψ_v) .

Адаптивные алгоритмы могут различаться правилом конструирования векторов $\mathbf{V}(f, \alpha_g, \psi_v)$, количеством используемых приемных каналов, а также количеством накоплений при оценке КМ $\mathbf{R}(f, \alpha_g, \psi_v)$ и вариантами возможной ее модификации.

Для классического алгоритма Кейпона [3, 15, 16]:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_K(f, \alpha_g, \psi_v) &= \\ &= \frac{\mathbf{R}^{-1}(f, \alpha_g, \psi_v) \mathbf{D}(f, \alpha_g, \psi_v)}{\mathbf{D}^*(f, \alpha_g, \psi_v) \mathbf{R}^{-1}(f, \alpha_g, \psi_v) \mathbf{D}(f, \alpha_g, \psi_v)}, \end{aligned} \quad (4)$$

$\mathbf{R}^{-1}(f, \alpha_g, \psi_v)$ — матрица, обратная матрице $\mathbf{R}(f, \alpha_g, \psi_v)$, $\mathbf{D}(f, \alpha_g, \psi_v)$ — вектор-столбец размерности N откликов базовых ПК на сигнал, поступающий с направления (α_g, ψ_v) .

Количество накоплений корреляционной матрицы $\mathbf{R}(f, \alpha_g, \psi_v)$ при реализации классического алгоритма Кейпона должно не менее чем в 4 раза превышать количество базовых каналов N .

Подстановка (4) в (3) дает для классического алгоритма Кейпона:

$$S_{\text{out}/K}(f, \alpha_g, \psi_v) = \left[\mathbf{D}^T(f, \alpha_g, \psi_v) \mathbf{R}^{-1}(f, \alpha_g, \psi_v) \mathbf{D}(f, \alpha_g, \psi_v) \right]^{-1}. \quad (5)$$

Основная идея быстрых проекционных алгоритмов, предложенных в [17–23], состоит в ограничении влияния на пеленгационный рельеф сигналов сильных ЛИ. Это достигается путем контролируемого уменьшения их уровней в КМ $\mathbf{R}(f, \alpha_g, \psi_v)$. При этом учитывается, что для получения всей необходимой информации об амплитудно-фазовом распределении сигналов сильных ЛИ достаточно вычислить КМ с количеством накоплений кардинально меньшим, чем при реализации классического алгоритма Кейпона. К тому же, как показали исследования [22], при малом количестве накоплений (суммарной длительностью не более десятых долей секунды) сохраняется когерентность рассеянной компоненты сигналов сильных ЛИ, что позволяет частично подавить ее, и тем самым повысить помехоустойчивость приемного тракта.

Дополнительным преимуществом применения адаптивного ограничения выходной мощности сигналов сильных локальных источников в сочетании с алгоритмом Кейпона, реализованным по выходу ПК, является повышенная устойчивость к воздействию сигналов сильных ЛИ, поступающих по лучам, отличающимся от направления формирования адаптивного канала по углу места. Для подавления таких помех с использованием только алгоритма Кейпона необходимо применение базовых каналов, развитых не только по горизонтали, но и по углу места, что приводит к кратному увеличению их числа, следовательно, объема обучающей выборки N , что, в свою очередь, ведет не только к взрывному росту вычислительных затрат, но и к росту рассеянной компоненты из-за утраты возможности адаптироваться к нестационарностям волновых фронтов. В то же время ограничение мощности помех обеспечивает подавление их бокового поля не только по азимуту, но и по углу места, что дает возможность ограничиться при реализации алгоритма Кейпона использованием лишь базовых каналов, совпадающих по углу места с направлением наблюдения ψ_v .

Процесс формирования модифицированной КМ $\mathbf{R}'(f, \alpha_g, \psi_v)$ с ограниченным уровнем сильных ЛИ выглядит следующим образом:

- определяется количество накоплений K КМ $\mathbf{R}(f, \alpha_g, \psi_v)$, как учетверенное значение числа базовых каналов ($4N$);
- совокупность K реализаций накопления КМ $\mathbf{R}(f, \alpha_g, \psi_v)$ разбивается на блоки из K_I реализаций, равных удвоенному количеству ожидаемого числа наиболее энергонесущих лучей сильных ЛИ в зоне обзора станции шумопеленгования;
- для каждого блока из K_I реализаций формируется КМ $\mathbf{R}_1(f, \alpha_g, \psi_v)$ путем выполнения следующих операций:

а) вычисляются собственные числа λ_m и соответствующие им собственные векторы $\mathbf{U}_m$ КМ $\mathbf{R}_1(f, \alpha_g, \psi_v)$ (M – количество собственных чисел и собственных векторов);

б) из вычисленных собственных чисел λ_m выбираются M_I старших собственных чисел, величины которых превышают значение порога, задаваемого относительно среднего уровня ненулевых младших собственных чисел;

в) КМ $\mathbf{R}_1(f, \alpha_g, \psi_v)$ корректируется путем уменьшения выбранных M_I старших собственных чисел λ_m до значения $\mu\lambda'$, где λ' – среднее значение ненулевых младших собственных чисел КМ, μ – экспериментально подбираемый параметр, управляющий уровнем подавления помех. Учитывая, что КМ $\mathbf{R}_1(f, \alpha_g, \psi_v)$ может быть представлена в виде [16]

$$\mathbf{R}_1(f, \alpha_g, \psi_v) = \sum_{n=1}^N \lambda_n(f) \mathbf{U}_n(f) \mathbf{U}_n^{*T}(f), \quad (6)$$

процедура преобразования КМ $\mathbf{R}_1(f, \alpha_g, \psi_v)$ в КМ $\mathbf{R}'_1(f, \alpha_g, \psi_v)$, в которой старшие собственные числа уменьшены до уровня $\mu\lambda'$, выглядит следующим образом:

$$\mathbf{R}'_1(f, \alpha_g, \psi_v) = \mathbf{R}_1(f, \alpha_g, \psi_v) - \sum_{m=1}^{M_I} [\lambda_m(f) - \mu\lambda'(f)] \mathbf{U}_m(f) \mathbf{U}_m^T(f); \quad (7)$$

г) осуществляется суммирование матриц $\mathbf{R}'_1(f, \alpha_g, \psi_v)$, сформированных по каждому блоку накоплений. Результатом суммирования является матрица $\mathbf{R}'_1(f, \alpha_g, \psi_v)$.

В результате пеленгационный рельеф при применении алгоритма Кейпона с контролируемым ограничением мощности сильных ЛИ вычисляется по формулам (1) и (5) при подстановке в формулу (5) КМ $\mathbf{R}_1^{-1}(f, \alpha_g, \psi_v)$ вместо КМ $\mathbf{R}^{-1}(f, \alpha_g, \psi_v)$:

$$S_{\text{out}/K}(f, \alpha_g, \psi_v) = \left[\mathbf{D}^T(f, \alpha_g, \psi_v) \mathbf{R}^{-1}(f, \alpha_g, \psi_v) \mathbf{D}(f, \alpha_g, \psi_v) \right]^{-1} \quad (8)$$

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Эффективность алгоритмов оценивалась путем имитационного моделирования следующей ситуации. В районе моря с известными гидроакустическими условиями неподвижно установлена станция шумопеленгования с цилиндрической многоэлементной антенной. В районе имеет место надводное судоходство с варьируемой при моделировании плотностью. Решается задача обнаружения малозумного ПО, пересекающего зону обзора станции шумопеленгования.

В качестве показателей эффективности при моделировании приняты зависимости от плотности надводного судоходства средние значения:

- дистанции обнаружения ПО;
- суммарного времени наблюдения ПО с момента его обнаружения до момента окончательной потери с ним акустического контакта.

Моделирование состоит из циклов. Циклом является однократное преодоление ПО зоны обзора станции шумопеленгования. Количество судов в районе определяется в соответствии с заданной плотностью судоходства. Начальные полярные координаты (пеленга и дистанции) относительно станции шумопеленгования, параметры движения и приведенная шумность судов определяются случайным образом в соответствии с их заданными статистическими характеристиками. На протяжении цикла все моделируемые объекты движутся с постоянными курсами и скоростями.

На протяжении каждого цикла с заданной периодичностью по времени моделируется обнаружение ПО станцией шумопеленгования с запоминанием моментов времени обнаружения и потери контакта. При этом одновременно моделируется работа нескольких алгоритмов пространственной обработки. По результатам каждого цикла определяются дистанция обнаружения ПО и суммарное

время его наблюдения, соответствующие каждому моделируемому алгоритму.

Моделирование циклов для одной плотности надводного судоходства повторяется 100 раз. По результатам всех циклов определяются средние значения времени обнаружения и суммарного времени наблюдения ПО, соответствующие каждому моделируемому алгоритму.

Описанное моделирование повторяется для разных значений плотности надводного судоходства в интервале от 10^{-4} до 10^{-2} судов/км².

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для сокращения времени счета все алгоритмы пространственной обработки моделировались на уровне вычисления математических ожиданий оценок КМ в версии по выходу сформированных пространственных каналов [7, 9].

Алгоритм моделирования выглядел следующим образом.

1. Формировались исходные данные для моделирования, которые включали:

- характеристики гидроакустических условий в районе;
- характеристики станции шумопеленгования;
- начальные координаты и параметры движения ПО, обеспечивающие его проход через зону обзора станции шумопеленгования;
- математические ожидания и среднеквадратические отклонения скорости и шумности надводных кораблей;
- шаг моделирования по времени;
- количество циклов моделирования для одной плотности надводного судоходства.

2. Организовывался перебор плотностей судоходства в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-2} км⁻²:

3. Случайным образом определялись: количество судов, соответствующих заданной плотности судоходства, начальные координаты, параметры движения и шумности каждого моделируемого судна.

4. Организовывался перебор с заданным шагом моментов времени, на которых осуществлялось моделирование работы алгоритмов пространственной обработки.

5. На каждый момент времени:

- а) вычислялись полярные координаты (дистанция и пеленг) каждого моделируемого объекта относительно станции шумопеленгования;

б) рассчитывалась лучевая структура сигнала каждого моделируемого объекта на входе приемной антенны станции шумопеленгования;

в) организовывался перебор заданных вертикальных ярусов характеристик направленности антенны (V – номер текущего яруса);

г) для текущего V -го яруса организовывался перебор ПК горизонтального веера характеристик направленности антенны (g – номер текущего ПК по горизонтали);

д) в каждом из ярусов V по отдельности для каждого текущего g -го ПК:

- определялись номера 7 базовых каналов, расположенных по горизонтали с шагом по пеленгу, равным ширине характеристики направленности антенны на верхней частоте рабочего диапазона частот, ориентированных симметрично относительно направления α_g ;
- вычислялась КМ $R(f, \alpha_g, \psi_v)$ смеси сигналов ЛИ и распределенной помехи на выходе 7 сформированных ПК горизонтального веера:

$$R(f, \alpha_g, \psi_v) = \sum_{b=1}^B R_{s/b}(f, \alpha_g, \psi_v) + R_n(f), \quad (9)$$

где B – количество сигналов ЛИ;

$R_{s/b}(f, \alpha_g, \psi_v)$ – КМ сигнала b -го ЛИ, вычисляемая по формуле:

$$R_{s/b}(f, \alpha_g, \psi_v) = \sum_{i=1}^{N_{\text{ray}/b}} S_{s/b,i}(f) W_{s/b,i}(f) W_{s/b,i}^*(f), \quad (10)$$

$N_{\text{ray}/b}$ – количество сигнальных лучей b -го ЛИ; $S_{s/b,i}(f)$ – энергетический спектр i -го луча сигнала b -го ЛИ на выходе линейной части приемного тракта; $W_{s/b,i}(f)$ – вектор-столбец размерности N откликов N базовых ПК на сигнал b -го ЛИ, p -й элемент которого вычисляется по формуле:

$$w_{s/b,i,p}(f) = d(\alpha_{b,i}, \psi_{b,i}, \alpha_p, \psi_v), \quad p = 1 - N, \quad (11)$$

$d(\alpha_{b,i}, \psi_{b,i}, \alpha_p, \psi_v)$ – отклик ПК горизонтального веера на сигнал ЛИ, пришедший с направления $(\alpha_{b,i}, \psi_{b,i})$ при компенсации ПК в направлении (α_p, ψ_v) ; $\alpha_{b,i}$ – угол прихода i -го луча сигнала b -го ЛИ в горизонтальной плоскости; $\psi_{b,i}$ – угол прихода i -го луча сигнала b -го ЛИ в вертикальной

плоскости; $R_n(f)$ – КМ распределенной помехи, элементы которой для выхода p_1 -го и p_2 -го базовых ПК вычисляются в виде

$$r_{n/p_1,p_2}(f) = S_n(f) k_{p_1,p_2}, \quad p_1 = 1 - N, \quad p_2 = 1 - N, \quad (12)$$

$S_n(f)$ – энергетический спектр распределенной помехи на выходе линейной части приемного тракта; k_{p_1,p_2} – коэффициент корреляции распределенной помехи на выходе p_1 -го и p_2 -го базовых ПК, приблизительно равный относительной площади пересечения характеристик направленности этих ПК.

- для каждого алгоритма вычислялся отклик текущего ПК (α_g, ψ_v) по формулам (5) и (8).

е) по завершении перебора ПК горизонтального веера и формирования пеленгационного рельефа в текущем вертикальном ярусе моделируется обнаружение ПО при использовании каждого алгоритма пространственной обработки в текущем вертикальном ярусе. ПО считается обнаруженным при одновременном выполнении трех условий:

- в пеленгационном рельефе в направлении на ПО наблюдается максимум;
- уровень пеленгационного рельефа в направлении на ПО превышает не менее чем на 3 дБ уровни, соответствующие левому и правому минимумам, ближайшим к направлению на ПО;
- в интервале курсовых углов от левого до правого минимумов отсутствуют другие ЛИ с уровнем относительно уровня сигнала ПО, превышающим минус 20 дБ.

Результат обнаружения либо не обнаружения ПО по данным каждого алгоритма запоминается;

ж) описанное моделирование повторяется для каждого из заданных вертикальных ярусов;

з) по завершении перебора всех ярусов для каждого алгоритма пространственной обработки принимается решение об обнаружении либо не обнаружении ПО на текущем шаге моделирования по правилу: если ПО был обнаружен хотя бы на одном вертикальном ярусе, он считается обнаруженным, в противном случае не обнаруженным. Данное решение, а также дистанция до ПО, запоминаются с привязкой ко времени текущего шага моделирования.

6. По завершении перебора всех шагов по времени с использованием динамики обнаружений ПО вычисляются дистанция его обнаружения,

соответствующая моменту первого обнаружения, и суммарное время наблюдения ПО, как произведение количества шагов, на которых ПО был обнаружен, на интервал времени между шагами.

7. Цикл моделирования, описанный в пп. 3)...6), повторяется 100 раз.

8. По результатам всех 100 циклов моделирования вычисляются средняя дистанция обнаружения ПО и среднее время его наблюдения, соответствующие заданной плотности судоходства.

9. Моделирование, описанное в пп. 3)...7) повторяется для каждой плотности судоходства.

10. По завершении перебора всех заданных плотностей судоходства для каждого алгоритма пространственной обработки строятся графики зависимости дистанции обнаружения и времени наблюдения ПО от плотности судоходства.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование проводилось при следующих исходных данных:

- гидроакустические условия: глубина района 200 м; скорость звука монотонно увеличивается с глубиной с градиентом 0.028 с^{-1} ; дно — ил-песок; волнение моря 2 балла;

- характеристики ПО: скорость 3 м/с; глубина 100 м; приведенная шумность на 30 дБ превышает приведенный уровень шумов моря;
- характеристики судоходства: скорость хода распределена по нормальному закону с матожиданием 7.5 м/с и среднеквадратическим отклонением 2 м/с; приведенная шумность также распределена по нормальному закону, матожидание шумности на 70 дБ превышает приведенный уровень шумов моря, среднеквадратическое отклонение составляет 3 дБ;
- характеристики неподвижно установленной станции шумопеленгования с цилиндрической антенной, заглубленной на 50 м: диаметр антенны 5 м, высота 3 м, рабочий диапазон частот 3.5–7.1 кГц, ширина характеристики направленности антенны в горизонтальной плоскости 2.7° , время когерентного накопления 20 с, обработка ведется одновременно во всем круговом секторе пеленгов и в 3-х вертикальных ярусах $-7^\circ, 0^\circ, +7^\circ$.

В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены траектории объектов на одном цикле моделирования при плотности судоходства 10^{-3} км^{-2} .

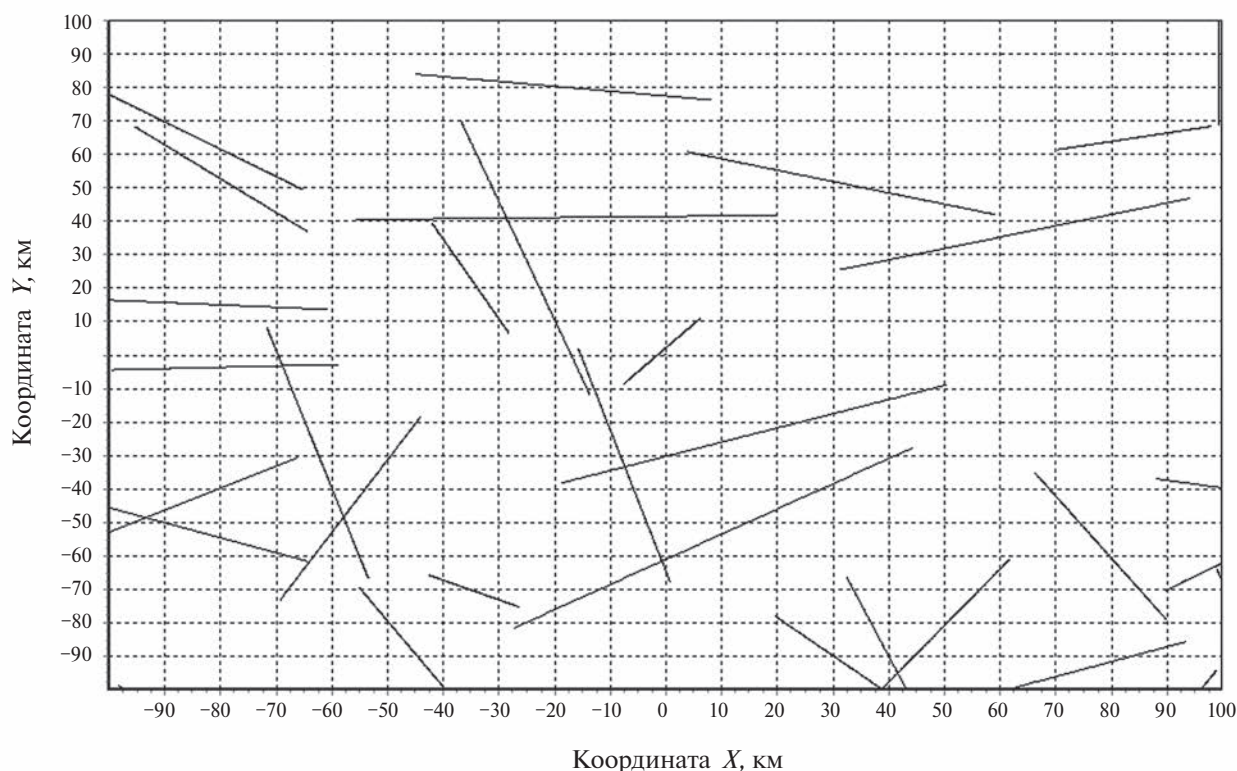


Рис. 1. Траектории судов на одном цикле моделирования при плотности судоходства 10^{-3} км^{-2} .

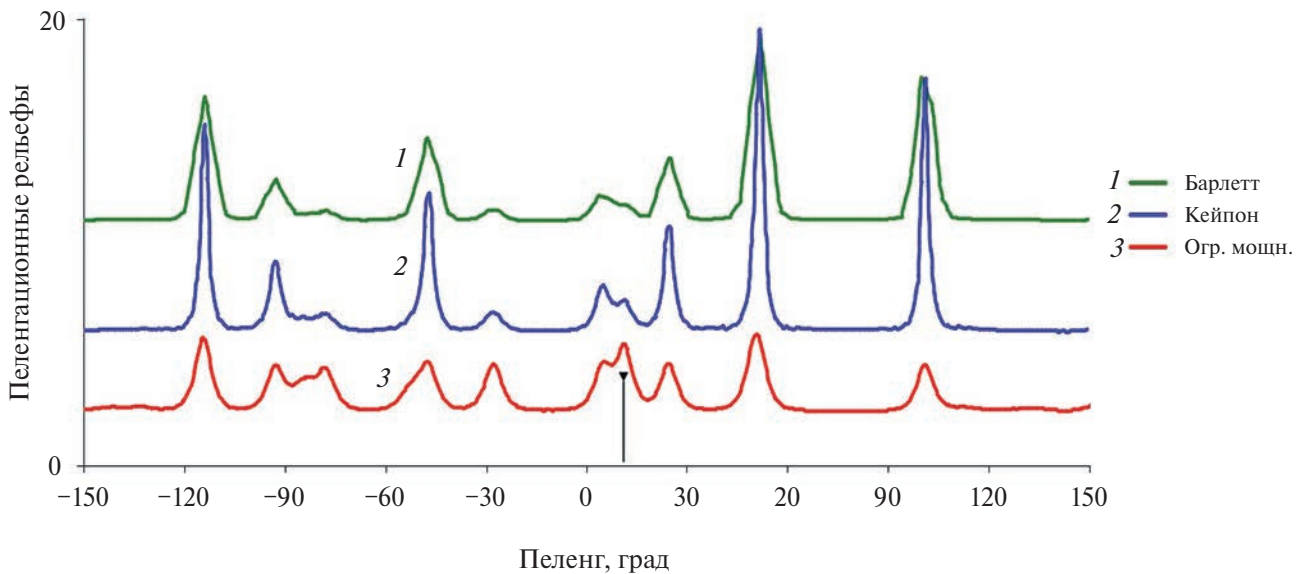


Рис. 2. Пеленгационные рельефы, соответствующие трем моделируемым алгоритмам — Бартлетта (зеленая линия), классического Кейпона (синяя линия), Кейпона с ограничением мощности сильных ЛИ (красная линия). Черная стрелка указывает направление на малозумный ПО.

На рис. 2 изображены пеленгационные рельефы, соответствующие трем моделируемым алгоритмам — Бартлетта (зеленая линия), классического Кейпона (синяя линия), Кейпона с ограничением мощности сильных ЛИ (красная линия). Черная стрелка указывает направление на малозумный ПО. Из рассмотрения рис. 2 следует, что наилучшие условия для обнаружения малозумного ПО предоставляет алгоритм Кейпона с ограничением мощности сильных ЛИ.

Результаты моделирования приведены на рис. 3–5 в виде зависимостей от логарифма плотности судоходства: среднего количества судов в круге радиуса 100 км (рис. 3); средней дистанции

обнаружения малозумного ПО (рис. 4); среднего времени наблюдения малозумного ПО (рис. 5).

Из рассмотрения рис. 4 и 5 можно сделать следующие выводы:

- при плотностях судоходства 10^{-4} км⁻² и менее характеристики обнаружения и сопровождения малозумного ПО практически не зависят от применяемого алгоритма;
- при плотностях судоходства 10^{-2} км⁻² и более обнаружение малозумного ПО на фоне шумов судоходства практически невозможно;
- применение классического алгоритма Кейпона позволяет по сравнению с использованием

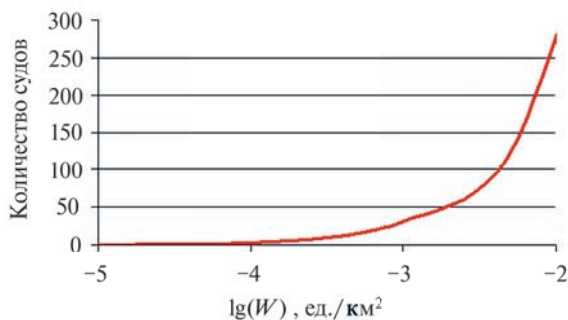


Рис. 3. Среднее количество судов в круге радиуса 100 км в зависимости от логарифма плотности судоходства W .

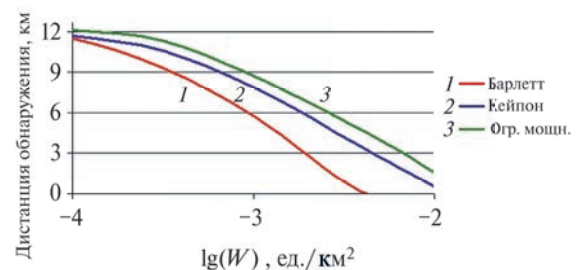


Рис. 4. Средняя дистанция обнаружения малозумного подводного объекта в зависимости от логарифма плотности судоходства W при использовании трех алгоритмов пространственной обработки.

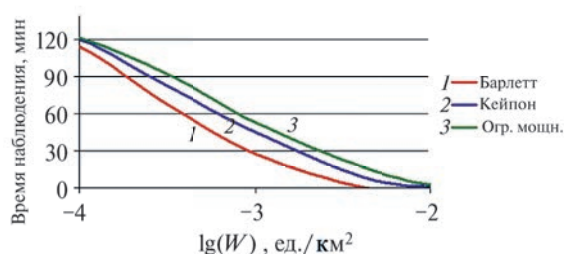


Рис. 5. Среднее время наблюдения малозумного подводного объекта в зависимости от логарифма плотности судоходства W при использовании трех алгоритмов пространственной обработки.

алгоритма Барлетта в условиях надводного судоходства увеличить дистанцию обнаружения малозумного ПО до 35%, а время наблюдения — до 60%;

- применение алгоритма Кейпона с ограничением мощности сильных локальных источников в тех же условиях по сравнению с использованием алгоритма Барлетта обеспечивает увеличение дистанции обнаружения малозумного ПО до 50%, а времени наблюдения — до 90%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для принятия решения о внедрении в гидроакустическую аппаратуру того либо иного алгоритма пространственной обработки сигналов на выходе многоэлементных антенн необходима количественная оценка эффективности этих алгоритмов с использованием показателей, представляющих наибольший интерес в условиях преимущественного использования конкретной гидроакустической аппаратуры.

В работе предложен вариант методики количественной оценки эффективности различных алгоритмов пространственной обработки при поиске и слежении за слабо шумящим подводным объектом (ПО) в условиях надводного судоходства различной плотности. В качестве показателей эффективности при моделировании вычислялись средние значения дистанции обнаружения ПО и времени наблюдения ПО с момента его обнаружения до момента окончательной потери с ним акустического контакта.

Работа выполнялась путем моделирования в однотипных условиях работы трех алгоритмов пространственной обработки — неадаптивного алгоритма Барлетта и адаптивного алгоритма Кейпона в классической версии и в версии с

применением процедуры контролируемого ограничения мощности сильных сигналов.

Моделирование показало, что наибольшей эффективностью обладает алгоритм Кейпона с применением процедуры контролируемого ограничения мощности сильных сигналов, который по сравнению с использованием алгоритма Барлетта обеспечивает увеличение дистанции обнаружения малозумного ПО до 50%, а времени наблюдения — до 90%.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №24-19-20001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burg J.P.* Maximum Entropy Spectral Analysis // Proc. 37th meeting Soc. Explor. Geophysics. 1967.
2. *Anderson V.C., Rudnick P.* Rejection of a coherent arrival at an array // J. Acoust. Soc. Am. 1969. V. 45. № 2.
3. *Capon J.* High Resolution Frequency-Wavenumber Spectral Analysis // Proc. IEEE. 1969. V. 57. P. 1408–1418.
4. *Frost O.L.* An Algorithm for Linearly Constrained Adaptive Array Processing // Proc. IEEE. 1972. V. 60. № 8. P. 926–935.
5. *Bienvenu G.* Influence of the spatial Coherence of the Background Noise on High Resolution Passive Methods // Proc IEEE ICASSP. 1979. P. 306–309.
6. *Сазонтов А.Г.* Локализация источника в переменном по трассе волноводе в условиях неполной информации о пространственной изменчивости среды распространения // Акуст. журн. 2022. Т. 68. № 6. С. 689–696.
7. *Gray D.A.* Formulation of The Maximum Signal to Noise Array in Beam Space // J. Acoust. Soc. Am. 1982. V. 72. № 14. P. 1195–1201.
8. *Малеханов А.И., Смирнов И.П.* Пространственная обработка акустических сигналов в каналах мелкого моря в условиях априорной неопределенности: оценки потерь эффективности // Акуст. журн. 2022. Т. 68. № 4. С. 427–439.
9. *Ильин И.М.* Оптимизация обработки сигналов на выходе сформированного веера характеристик направленности // Вопросы судостроения. Серия «Общетехническая». 1984. Вып. 75. С. 49–54.
10. *Schmidt R.O.* Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Trans. 1986. V. AP-34. № 3. P. 276–280.
11. *Раевский М.А., Бурдуковская В.Г.* Пространственная обработка акустических сигналов в океанических волноводах на фоне шумов ветрового

- происхождения // Акуст. журн. 2023. Т. 69. № 1. С. 73–83.
12. *Gershman A.B.* Robust Adaptive Beamforming in Sensor Arrays // *Int. Journ. Electronics and Communications*. 1999. V. 53. P. 305–314.
 13. *Монзинго Р.А., Миллер Т.У.* Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию. М., 1986, 446 с.
 14. *Krim H., Viberg M.* Two decades of array signal processing research // *IEEE Signal Processing Magazine*. 1996. № 7. P. 67–95.
 15. *Van Trees H.L.* Optimum Array Processing: Part IV. Detection, Estimation, and Modulation Theory. Wiley Interscience, 2002. P. 1470.
 16. *Малышкин Г.С.* Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Т. 2. Адаптивные методы. ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2011. 374 с.
 17. *Малышкин Г.С., Сидельников Г.Б.* Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов (обзор) // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 5. С. 526–545.
 18. *Ратынский М.В.* Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радиоисвязь, 2004. 199 с.
 19. *Малышкин Г.С., Шафранюк А.В.* Адаптивное разрешение широкополосных гидроакустических сигналов с частично нарушенной когерентной структурой // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 5. С. 613–629.
 20. *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.
 21. *Малышкин Г.С.* Сравнительная эффективность классических и быстрых проекционных алгоритмов при разрешении слабых гидроакустических сигналов // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 2. С. 196–208.
 22. *Малышкин Г.С.* Экспериментальная проверка эффективности быстрых проекционных алгоритмов // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 6. С. 828–847.
 23. *Малышкин Г.С., Мельканович В.С.* Классические и быстрые проекционные адаптивные алгоритмы в гидроакустике. СПб.: ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2022. 268 с.
 24. *Мельканович В.С.* Особенности построения адаптивной обработки сигналов по выходу цилиндрической антенной решетки с горизонтальной образующей // Сборник материалов конференции «Управление в морских системах» (УМС-2020). СПб., 2020.

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF ADAPTIVE SPATIAL PROCESSING ALGORITHMS IN SEARCHING FOR LOW-NOISE UNDERWATER VEHICLES IN SURFACE SHIPPING CONDITIONS OF DIFFERENT DENSITY

A. I. Mashoshin^{a,*}, V. S. Melkanovich^a

^aJSC "Concern" Central Research Institute "Electropribor", st. Malaya Posadskaya 30,
St. Petersburg, 197046 Russia

*e-mail: aimashoshin@mail.ru

The article describes the methodology and provides the results of a model quantitative assessment of the effectiveness of solving the problem of detecting and tracking a low-noise underwater object using three algorithms for spatial signal processing at the output of a multi-element antenna — the non-adaptive Bartlett algorithm, the Capon algorithm, and the Capon algorithm combined with a projection procedure limiting the signal power of strong local sources.

Keywords: hydroacoustics, multi-element antenna, spatial processing, adaptive algorithms, orthogonal projector, modeling