

Сравнение эффективности адаптивных алгоритмов обнаружения малозумных объектов в условиях судоходства различной интенсивности*

Машошин А.И., Мельканович В.С.

АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
aimashoshin@mail.ru, vmelkanovich@mail.ru

Аннотация. Описывается методика и приводятся результаты модельной количественной оценки эффективности решения задачи обнаружения и отслеживания малозумного подводного объекта (ПО) с применением трёх 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. Приведено описание моделируемых алгоритмов, изложена методика моделирования и представлены результаты моделирования применительно к условиям мелкого моря. В качестве показателей эффективности при моделировании оценивались зависимости от плотности надводного судоходства средние значения дистанции обнаружения малозумного подводного объекта и суммарное время наблюдения объекта с момента его обнаружения до момента окончательной потери с ним акустического контакта. Моделирование показало, что наибольшей эффективностью обладает алгоритм Кейпона с применением процедуры контролируемого ограничения мощности сильных сигналов, который по сравнению с использованием алгоритма Бартлетта обеспечивает увеличение дистанции обнаружения малозумного ПО до 50%, а время наблюдения – до 90%.

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

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений развития гидроакустики является повышение помехоустойчивости и разрешающей способности режимов шумопеленгования гидроакустических комплексов за счёт 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 учёта 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 объёму 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 счёт 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 мощ-

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Автоматизация", <https://rusautocon.org>

ных 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.

Также важной особенностью быстрых проекционных алгоритмов является 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, посвящённых адаптивным алгоритмам пространственной обработки, с трудом можно найти работы, в которых бы была 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 путём сравнительного моделирования в однотипных условиях трёх 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 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 локальных источников (ЛИ), относящийся к быстрым проекционным алгоритмам [23].

Алгоритм Кейпона обладает свойством сверхразрешения, т.е. его применение обеспечивает сужение отметок сильных ЛИ в пеленгационном рельефе. Причём 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 приёмного тракта составляло не менее 0 дБ [16]. Для сигналов меньшего уровня отклики алгоритма Кейпона и неадаптивного обзора практически одинаковы. Вместе с тем, даже при максимальном сужении отметки сильных ЛИ её ширина на уровне распределённой помехи составляет 2-3 ширины характеристики направленности антенной решётки, 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

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

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 Экарта, максимизирующий ОСШ при приёме широкополосного сигнала [16]; $S_{out}(f, \alpha_g, \psi_v)$ – энергетический спектр смеси сигналов ЛИ и распределённой 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 нечётное количество N сформированных ПК, ближайших к осветляемому каналу, 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 распределённой помехи для базовых ПК, соответствующих направлению наблюдения (α_g, ψ_v) , вычисляется как

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

где $G(f, \alpha_g, \psi_v)$ – вектор-столбец размерности N комплексных спектров смеси сигналов ЛИ и распределённой

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 распределённой помехи $S_{out}(f, \alpha_g, \psi_v)$ равен центральному элементу КМ $\mathbf{R}(f, \alpha_g, \psi_v)$.

Большинство адаптивных алгоритмов пространственной обработки имеют идентичную структуру, определяемую в виде (далее аргументы в скобках для сокращения записи будем опускать)

$$S_{out} = \mathbf{V}^* \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{V}, \quad (3)$$

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

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

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

$$\mathbf{V}_k = \frac{\mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{D}}{\mathbf{D}^* \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{D}}, \quad (4)$$

где $\mathbf{R}^{-1}(f, \alpha_g, \psi_v)$ – 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) даёт для классического алгоритма Кейпона:

$$S_{out/K} = [\mathbf{D}^* \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{D}]^{-1}. \quad (5)$$

Основная идея быстрых проекционных алгоритмов, предложенных в [17-23], состоит в ограничении влияния на пеленгационный рельеф сигналов сильных ЛИ. Это достигается путём 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 её, и тем самым повысить помехоустойчивость приёмного 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 s , 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_1 реализаций, равных удвоенному количеству ожидаемого числа наиболее энергонесущих лучей сильных ЛИ в зоне обзора станции шумопеленгования;
- для каждого блока из K_1 реализаций формируется КМ $\mathbf{R}_l(f, \alpha_g, \psi_v)$ путем выполнения следующих операций:

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

б) из вычисленных собственных чисел λ_m выбираются M_1 старших собственных чисел, величины которых превышают значение порога, задаваемого относительно среднего уровня ненулевых младших собственных чисел;

в) КМ $\mathbf{R}_l(f, \alpha_g, \psi_v)$ корректируется путем уменьшения выбранных M_1 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 $\mathbf{R}_l(f, \alpha_g, \psi_v)$ может быть представлена в виде [16]

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

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

$$\mathbf{R}'_i = \mathbf{R}_i - \sum_{m=1}^{M_i} [\lambda_m - \mu \cdot \lambda'] \cdot \mathbf{U}_m, \quad (7)$$

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

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 $\mathbf{R}^{-1}(f, \alpha_g, \psi_v)$ вместо КМ $\mathbf{R}^{-1}(f, \alpha_g, \psi_v)$:

$$S_{out/K} = [\mathbf{D}^* \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{D}]^{-1}. \quad (8)$$

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Эффективность алгоритмов оценивалась путём 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 малошумного 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 приведённая 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование проводилось при следующих исходных данных:

- гидроакустические условия: глубина района 200 м; скорость звука монотонно увеличивается с глубиной с градиентом $0,028 \text{ с}^{-1}$; дно – ил-песок; волнение моря 2 балла;
- характеристики ПО: скорость 3 м/с; глубина 100 м; приведённая шумность на 30 дБ превышает приведённый уровень шумов моря;
- характеристики судоходства: скорость хода распределена по нормальному закону с матожиданием 7,5 м/с и среднеквадратическим отклонением 2 м/с; приведённая шумность также распределена по нормальному закону, матожидание шумности на 70 дБ превышает приведённый уровень шумов моря, среднеквадратическое отклонение составляет 3 дБ;
- характеристики неподвижно установленной станции шумопеленгования с цилиндрической антенной, заглублённой 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 $2,7^\circ$, время когерентного накопления 20 с, обработка ведётся одновременно во всём круговом секторе пеленгов и в 3-х вертикальных ярусах $-7^\circ, 0^\circ, +7^\circ$.

На рис. 1 изображены пеленгационные рельефы, соответствующие трём моделируемым алгоритмам – Бартлетта (зелёная линия), классического Кейпона (синяя линия), Кейпона с ограничением мощности сильных ЛИ (красная линия). Чёрная стрелка указывает направление на малошумный ПО. Из рассмотрения рис.1 следует, что наилучшие условия для обнаружения малошумного ПО предоставляет алгоритм Кейпона с ограничением мощности сильных ЛИ.

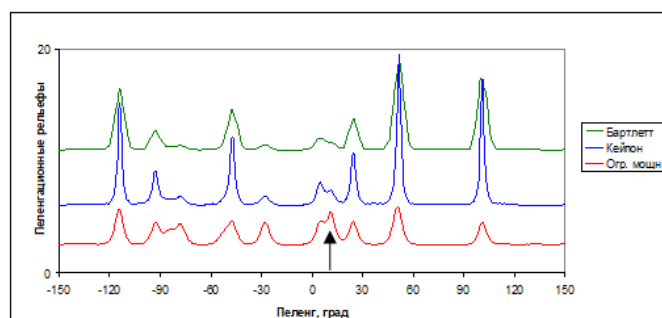


Рис. 1. Пеленгационные рельефы, соответствующие трём моделируемым алгоритмам – Бартлетта (зелёная линия), классического Кейпона (синяя линия), Кейпона с ограничением мощности сильных ЛИ (красная линия). Чёрная стрелка указывает направление на малошумный ПО

Результаты моделирования приведены на рис. 2-4 в виде зависимостей от логарифма плотности судоходства:

- среднего количества судов в круге радиуса 100 км (рис. 2);
- средней дистанции обнаружения малошумного ПО (рис. 3);
- среднего времени наблюдения малошумного ПО (рис. 4).

Из рассмотрения рис. 3 и 4 можно сделать следующие выводы:

- при плотностях судоходства 10^{-4} км^2 и менее характеристики обнаружения и сопровождения малошумного ПО практически не зависят от применяемого алгоритма;

- при плотностях судоходства 10^{-2} км² и более обнаружение малозумного ПО на фоне шумов судоходства практически невозможно;
- применение классического алгоритма Кейпона позволяет по сравнению с использованием алгоритма Бартлетта 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 Бартлетта обеспечивает увеличение дистанции обнаружения малозумного ПО до 50%, а время наблюдения – до 90%.

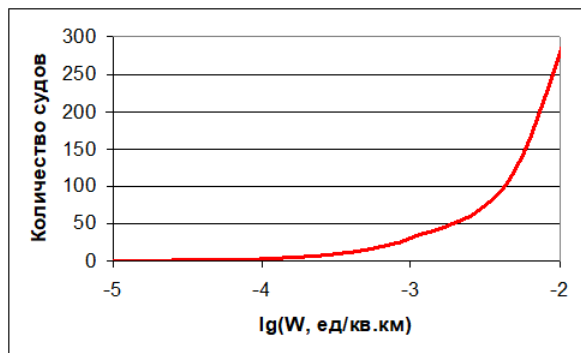


Рис. 2. Среднее количество судов в круге радиуса 100 км в зависимости от плотности судоходства

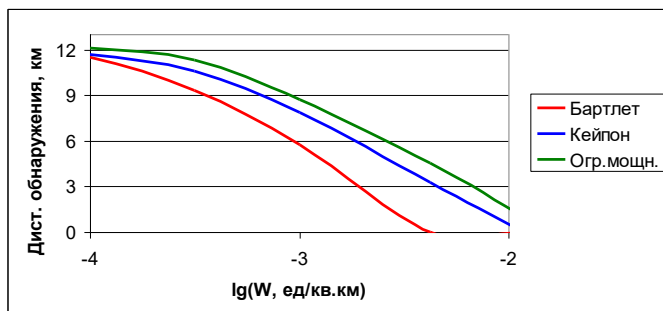


Рис. 3. Средняя дистанция обнаружения малозумного подводного объекта в зависимости от логарифма плотности судоходства при использовании трёх алгоритмов пространственной обработки

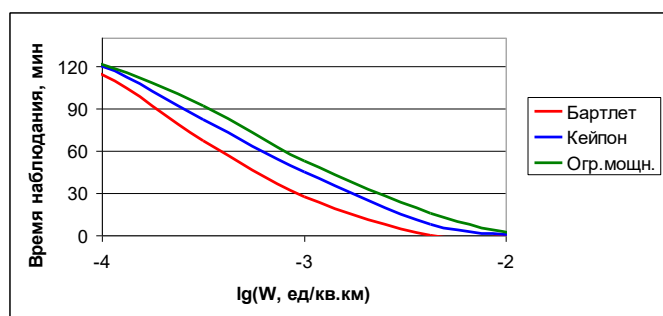


Рис. 4. Среднее время наблюдения малозумного подводного объекта в зависимости от логарифма плотности судоходства при использовании трёх алгоритмов пространственной обработки

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 путём моделирования в однотипных условиях работы трёх алгоритмов пространственной обработки – неадаптивного алгоритма Бартлетта 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 Бартлетта обеспечивает увеличение дистанции обнаружения малозумного ПО до 50%, а время наблюдения – до 90%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Burg J.P. Maximum Entropy Spectral Analysis // Proc. 37th meeting Soc. Explor. Geophysics. – 1967.
2. Anderson V.C. Rejection of a coherent arrival at an array / V.C. Anderson, P. Rudnick // JASA. – 1969. – Vol. 45, no 2.
3. Capon J. High Resolution Frequency-Wavenumber Spectral Analysis // Proc. IEEE. – 1969. – Vol. 57. – P. 1408-1418.
4. Frost O.L. An Algorithm for Linearly Constrained Adaptive Array Processing // Proc. IEEE. – 1972. – Vol. 60, no 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 // JASA. – 1982. – Vol. 72, no 14. – P. 1195-1201.
8. Малеханов А.И. Пространственная обработка акустических сигналов в каналах мелкого моря в условиях априорной неопределенности: оценки потерь эффективности / А.И. Малеханов, И.П. Смирнов // 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. – Vol. AP-34, no.3. – P. 276-280.

11. Раевский М.А. Пространственная обработка акустических сигналов в океанических волноводах на фоне шумов ветрового происхождения / М.А. Раевский, В.Г. Бурдуковская // Акуст. журн. – 2023. – Т.69, №1. – С. 73-83.

12. Gershman A.V. Robust Adaptive Beamforming in Sensor Arrays // Int. Journ. Electronics and Communications. – 1999. – Vpl.53. – P. 305-314.

13. Монзинго Р.А. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию / Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер. – М., 1986. – 446 с.

14. Krim H. Two decades of array signal processing research / H. Krim, M. Viberg // 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. – СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор", 2011. – 374 с.

17. Малышкин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов (обзор) / Г.С. Малышкин, Г.Б. Сидельников // 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. Адаптивное разрешение широкополосных гидроакустических сигналов с частично нарушенной когерентной структурой / Г.С. Малышкин, А.В. Шафранок // Акуст. журн. – 2013. – Т.59, №5. – С. 613-629.

20. Малышкин Г.С. Обнаружение слабых гидроакустических сигналов на основе быстрых проекционных алгоритмов / Г.С. Малышкин, А.С. Кузнецова, Г.Б. Сидельников // 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. Классические и быстрые проекционные адаптивные алгоритмы в гидроакустике / Г.С. Малышкин, В.С. Мельканович. – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 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), 2020.

DOI: 10.24892/RIJE/20240404

Quantitative Assessment of the Effectiveness of Adaptive Spatial Processing Algorithms in Conditions of Surface Shipping of Various Densities

Mashoshin A.I., Melkanovich V.S.

JSC Concern Central Research Institute Elektropribor

St. Petersburg, Russian Federation

aimashoshin@mail.ru, vmelkanovich@mail.ru

Abstract. The article describes the methodology and presents 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, as well as the Capon algorithm combined with a projection procedure for limiting the most powerful signals from local sources. The description of the simulated algorithms is given, the modeling methodology is described and the simulation results are presented in relation to shallow water conditions. The average values of the detection distance of a low-noise underwater object and the total observation time of

the object from the moment of its detection to the moment of the final loss of acoustic contact with it were estimated as indicators of efficiency in modeling. The simulation showed that the Capon algorithm with the application of the procedure of controlled limitation of the power of strong signals has the greatest efficiency, which, compared with the use of the Bartlett algorithm, provides an increase in the detection distance of low-noise software up to 50%, and the observation time up to 90%.

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

Библиографическое описание статьи

Машошин А.И. Сравнение эффективности адаптивных алгоритмов обнаружения малошумных объектов в условиях судоходства различной интенсивности / А.И. Машошин, В.С. Мельканович // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2024. – Т.11, №4. – С. 23-28. DOI: 10.24892/RIJE/20240404

Reference to article

Mashoshin A.I., Melkanovich V.S. Quantitative assessment of the effectiveness of adaptive spatial processing algorithms in conditions of surface shipping of various densities, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2024, vol.11, no.4, pp. 23-28. DOI: 10.24892/RIJE/20240404