

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 681.88

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КЛАССИЧЕСКИХ И БЫСТРЫХ
ПРОЕКЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ПРИ РАЗРЕШЕНИИ СЛАБЫХ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

© 2017 г. Г. С. Малышкин

ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»
197046 Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская 30

e-mail: genstepmal@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.01.2016 г.

Определены соотношения по оптимизации выборочной оценки корреляционной матрицы классических (исходных и модифицированных) и быстрых проекционных алгоритмов в сложной помеховой ситуации. Проведены модельные исследования по сравнению разрешающей способности классических оптимизированных алгоритмов с характеристиками двух вариантов быстрых проекционных алгоритмов. Сравнение алгоритмов проведено по критерию уменьшения времени и сокращения угловой зоны потери контакта со слабой целью при пересечении ею трассы сильного мешающего сигнала. Определены соотношения по наиболее экономной реализации быстрого алгоритма.

Ключевые слова: классические и быстрые проекционные алгоритмы, оптимизация корреляционной матрицы, модельные исследования, количественные оценки результатов.

DOI: 10.7868/S0320791917020095

1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КЛАССИЧЕСКИХ
И БЫСТРЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ
АЛГОРИТМОВ ПРИ ПРИЕМЕ
СЛАБЫХ СИГНАЛОВ

При обнаружении слабых гидроакустических сигналов в присутствии сильных мешающих локальных сигналов приходится считаться с особенностями структуры этих сигналов, обусловленной условиями многолучевого распространения и рассеяния. Дополнительные мешающие факторы, порожденные этими явлениями, вносят существенные коррективы в классическую теорию разрешения сигналов (см. [3, 4, 7]), основанную на использовании плосковолновых моделей. Вопросам влияния условий многолучевого распространения, рассеяния и технических параметров приемного тракта посвящены работы [8–10], в которых показано существенное влияние этих эффектов на разрешение слабых гидроакустических сигналов в присутствии интенсивных мешающих источников.

В работах [12, 13] сформулированы предложения по повышению разрешающей способности классических [12] и быстрых проекционных [13] алгоритмов, которые основаны на коррекции собственных чисел выборочных оценок корреляционных матриц перед их использованием в алгоритме Кейпона или в алгоритме, основанном

на использовании выборки, откорректированной с помощью ортогонального проектора. Сопоставление результатов разрешения слабых сигналов оптимизированными классическими и быстрыми проекционными алгоритмами показали существенное преимущество быстрых проекционных алгоритмов по сравнению с традиционными классическими алгоритмами.

Целью настоящей статьи является определение сравнительных характеристик разрешения слабых сигналов быстрыми проекционными алгоритмами и классическими алгоритмами, а также алгоритмами после глубокой модернизации выборочной оценки корреляционной матрицы последних в присутствии интенсивных мешающих сигналов. В первой части статьи обоснуются и формулируются основные варианты оптимизации классических и быстрых проекционных алгоритмов, во второй части проводится их модельная проверка и сопоставительный анализ в сложной помеховой ситуации. Основная задача настоящей статьи – провести сопоставление результатов на основе быстрых проекционных алгоритмов с результатами классических алгоритмов после их оптимизации, максимально ориентированной на создание благоприятных условий для обнаружения и разрешения наиболее слабых сигналов при наличии интенсивных мешающих источников.

Несмотря на то, что рассматриваемые варианты оптимизации классических алгоритмов сложны для практической реализации, проводимые исследования принципиально важны для оценки потенциальных возможностей ослабления мешающего действия интенсивных гидроакустических сигналов в условиях многолучевого распространения и рассеяния. Одновременно определяется место быстрых проекционных в ряду классических алгоритмов и причины их более высокой эффективности.

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 (СА), элементами выборки являются векторы-столбцы $X(n, t)$ размерности L , которые определяют выборку n -го спектрального отсчета в элементах антенны на t -м интервале СА. Спектральные отсчеты разбиты на

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

частотных групп (адаптивных поддиапазонов) $1, \dots, r, \dots, N_1$ по $1, \dots, p, \dots, K$ спектральных отсчетов в каждой.

Каждая из r частотных групп на T_a интервалах СА определяет адаптивную входную выборку, с помощью которой осуществляются процедуры адаптивной обработки. Адаптивная выборка с номером r состоит из $1, \dots, t, \dots, T_a$ векторов-столбцов размерности $L \times K$:

$$X_r(r) = X_r(1, r), \dots, X_r(p, r), \dots, X_r(K, r), \quad (2)$$

общий размер каждой адаптивной выборки $1, \dots, r, \dots, N_1$ равен $N_a = T_a K$ векторов-столбцов размерности L . Размерность адаптивной группы определяется видом используемого адаптивного алгоритма; для классических адаптивных алгоритмов, использующих выборочную оценку корреляционной матрицы, объем выборки при обнаружении слабых сигналов должен быть не менее $4L$.

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 [2], или при достаточно узкой полосе частот возможно использование спектральных от-

счетов без предварительной операции фокусировки при допустимом снижении эффективности обнаружения. Следующий пеленгационный рельеф формируется после смещения входной выборки по времени на один или несколько интервалов СА.

1.1. Классические адаптивные алгоритмы

Классические алгоритмы для r -й группы частот на T_a временных интервалах оперируют с выборочной оценкой корреляционной матрицы вида

$$\begin{aligned} \hat{Q}(r, T) &= \frac{1}{N_a} \sum_{t=1}^{T_a} \sum_{p=1}^K X_t(p, r) X_t^{*T}(p, r) = \\ &= \frac{1}{N_a} \sum_{t=1}^{T_a} \sum_{k=1}^K \sigma_{kt}^2(r) U_{kt}(r) U_{kt}^{*T}(r) = \frac{1}{T_a} \times \\ &\times \sum_{t=1}^{T_a} U_t(r) (\text{diag} \sigma_{kt}^2(r)) U_t^{*T}(r) = \sum_{l=1}^L \sigma_l^2(r) U_l(r) U_l^{*T}(r), \end{aligned} \quad (3)$$

где p определяет суммирование по номерам спектральных отсчетов, t по интервалам СА, а k — номера собственных чисел и собственных векторов при сингулярном разложении коротких выборок. Отметим, что в формуле (3) во втором равенстве σ_{kt}^2 и $U_{kt}(r)$ являются собственными числами и собственными векторами частных корреляционных матриц, сформированных из $K(1, \dots, p, \dots, K)$ выборок на t -м интервале. В формуле (3) $U_t(r)$ — матрица размерности $L \times K$ из $1, \dots, k, \dots, K$ собственных векторов частной матрицы $\frac{1}{K} \sum_{p=1}^K X_t(p, r) X_t^{*T}(p, r)$, составленной из K выборок r -й группы на t -м временном интервале, а $\text{diag} \sigma_{kt}^2(r)$ — диагональная матрица (размерности $K \times K$) собственных чисел этой матрицы. В соотношении (3) значок $\hat{\cdot}$ над обозначением матрицы $\hat{Q}(r, T)$ характеризует ее выборочный характер.

В результате суммирования частных матриц в последнем равенстве формируется итоговая матрица полного ранга, состоящая из L собственных чисел и собственных векторов, при этом собственные векторы $U_l(r)$ определяют фазовую структуру, а $\sigma_l^2(r)$ — интенсивность l -го процесса, входящего в суммарный процесс, сформированный для r -й группы частот на T_a интервалах СА.

Для быстрых проекционных алгоритмов формируется “короткая” выборка, объем которой больше, чем число сильных мешающих источни-

— оптимизирующая матрица, задающая весовые коэффициенты, с которыми используются собственные векторы в каждой адаптивной группе.

В соотношении (5) производится накопление T_a частных матриц, где проведена предварительная оптимизационная корректировка весовых коэффициентов на каждом частном временном интервале накопления, в результате чего формируется матрица полного ранга. Сущность этой корректировки заключается в том, что для оптимизации приема слабых сигналов M_1 старшие собственные вектора используются с весовыми коэффициентами b_m меньше единицы, а весовые коэффициенты остальных собственных векторов — после нормирования на собственное число с номером M_1 . Собственные числа помех и слабых сигналов начинаются с величины, близкой к единице, и уменьшаются по мере увеличения номера собственного числа. Дальнейшая обработка заключается в использовании полученной матрицы по схеме, аналогичной алгоритму Кейпона, с последующим накоплением по всем частотным адаптивным группам (алгоритм СапонОПТ).

Возможен также вариант оптимизации весовых коэффициентов при собственных векторах частных матриц, который реализуется путем накопления в формуле (5) не короткой матрицы (4), а ее ортогонального проектора (см. соотношение (11)), что позволяет сформировать алгоритм с проекционной корректировкой корреляционной матрицы (СапонPr).

Примеры рассмотренных четырех вариантов корреляционных матриц для 96-элементной антенны и помеховой ситуации проанализированы далее в разделе, посвященном математическому моделированию в рамках типовой помеховой ситуации.

Общая схема построения пеленгационного рельефа классического алгоритма заключается в следующем:

1) формирование корреляционной матрицы конкретного варианта исходного или оптимизированного адаптивного алгоритма;

2) обработка каждой частотной адаптивной группы с каждым вариантом модификации алгоритма с помощью алгоритма типа Кейпона;

3) накопление результатов по всей совокупности адаптивных групп (и, при необходимости, по времени) для формирования общего объема выборки, достаточного для обнаружения наиболее слабого сигнала:

$$S_{\text{оптj}} = \sum_{r=1}^{N_1} S_{\text{оптj}}(r) = \sum_{r=1}^{N_1} \frac{1}{V_j^{*T}(r) \hat{Q}_{\text{опт}}^{-1}(r, T) V_j(r)} \quad (7)$$

Таким образом, для классической схемы адаптивных алгоритмов, использующей формирование и обращение корреляционной матрицы размерности L , сформированной при объеме выбор-

ки не менее учетверенного числа элементов антенны, в дальнейшем рассматриваются, исследуются и сравниваются четыре варианта: классический вариант алгоритма Кейпона и три его модификации для обнаружения наиболее слабых сигналов. Первая модификация реализуется после традиционного накопления выборочной оценки корреляционной матрицы объемом $4L$, ее коррекции посредством уменьшения веса M_1 старших собственных векторов. Вторая и третья модификация реализуются после оптимизационной коррекции частных корреляционных матриц (4) алгоритмами (5), (6) или (11).

1.2. Быстрые проекционные алгоритмы

Рассмотрим два варианта быстрых проекционных алгоритмов:

а) алгоритм на основе ортогонального проектора.

$$\begin{aligned} S_{ji}(r) &= \\ &= V_j^{*T}(r) X_t(r) \left[X_t^{*T}(r) X_t(r) \right]^{-1} X_t^{*T}(r) V_j(r) = \\ &= Z_{ji}^{*T}(r) Y_t(r) \left[\text{diag} \left(\frac{1}{\sigma_{kt}^2(r)} \right) \right] Y_t^{*T}(r) Z_{ji}(r) = \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= Z_{0ji}^{*T}(r) Y_t(r) Y_t^{*T}(r) Z_{0ji}(r) = \\ &= V_j^{*T}(r) U_t^{*T}(r) U_t(r) V_j(r), \end{aligned}$$

$$\text{где } Z_{ji}^{*T}(r) = V_j^{*T}(r) X_t(r), \quad (9)$$

$$Z_{0ji}^{*T}(r) = Z_{ji}^{*T}(r) \text{diag} \frac{1}{\sqrt{\sigma_{kt}^2}} \quad (10)$$

— сформированные каналы (9) в j -м направлении наблюдения с использованием выборки r -й адаптивной группы частот на t -м интервале СА и откорректированная версия этого алгоритма (10);

$$X_t(r) \left[X_t^{*T}(r) X_t(r) \right]^{-1} X_t^{*T}(r) \quad (11)$$

— ортогональный проектор на основе выборки r -й адаптивной группы на t -м интервале СА; $Y_t(r)$ — матрица K собственных векторов (размерности K) матрицы $X_t^{*T}(r) X_t(r)$; $U_t(r)$ — матрица K собственных векторов (размерности L) матрицы $X_t(r) X_t^{*T}(r)$.

Соотношение (8) определяет два варианта реализации с использованием спектрального разложения элементов ортогонального проектора:

1) на основе сформированных пространственных каналов и собственных векторов $Y_t(r)$;

2) на основе векторов направления и собственных векторов $U_t(r)$.

б) алгоритм, оптимизированный для обнаружения наиболее слабых сигналов.

В отличие от (8), где используются некорректированные веса собственных векторов, для не-

2. МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛАССИЧЕСКИХ И БЫСТРЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

Модельные сравнительные исследования классических и быстрых проекционных алгоритмов при типовых помеховых ситуациях проводились в рамках единого варианта имитированного поля, воздействующего на элементы антенны; при этом для разных вариантов алгоритмов тождественны не только параметры помеховой ситуации, но и конкретные реализации воздействий на элементах антенны.

В широком диапазоне частот и времени аналогичной обработке подвергаются и накапливаются сигналы всех адаптивных групп при различных конкурирующих друг с другом вариантах адаптивных алгоритмов, строятся пеленгационные рельефы, и трассы всех сигналов выявляются с помощью алгоритмов, основанных на применении алгоритмов двустороннего пространственного контраста [14].

Рассмотрим далее результаты модельных исследований. На линейную эквидистантную антенну из 96 элементов воздействуют 14 сигналов, характер перемещения которых в пространстве и во времени определяется рис. 1. По оси абсцисс показано направление на источники (синус угла наблюдения), а по оси ординат — время, измеряемое в номерах тактов СА. Общее время наблюдения включает 1200 временных интервалов СА, на каждом из которых используется 2257 спектральных отсчетов в полосе частот с отношением верхней частоты к нижней 1.52, при этом спектральный состав в пределах этой полосы для всех сигналов предполагался равномерным. На среднеарифметической частоте используемого диапазона волновой размер антенны составляет 44.8.

Особенностью рассматриваемой помеховой ситуации является ее сложность за счет большого числа источников, большого разнообразия соотношений 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 -2 до -3 дБ. Следующие четыре сигнала имеют интенсивности ниже на $17-18$ дБ (тонкие линии), следующие за ними два сигнала имеют интенсивности еще ниже на 5 дБ (пунктирные линии), и четыре самых слабых сигнала имеют интенсивности в среднем -29 дБ (точечные линии) по отношению к наиболее сильным сигналам. Уровень некогерентных распределенных помех на ненаправленном элементе антенны равен 0 дБ. Коэффициенты когерентности сильных и средних сигналов равны 0.72 , интерва-

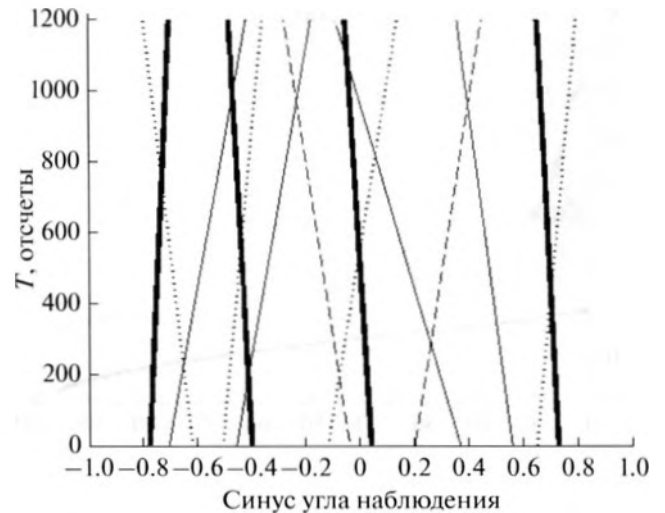


Рис. 1. Взаимное положение источников и их перемещение в процессе наблюдения.

лы временной корреляции флуктуаций (на уровне 0.6) ~ 5 интервалов СА, интервалы частотной корреляции флуктуаций ~ 35 частотных отсчетов, интервалы пространственной корреляции $10-20$ расстояний между элементами антенны. Условия многолучевого распространения имитировались двумя лучами с одинаковым азимутом и разными углами скольжения, так что лучи имели близкие, но различные углы прихода к линейной антенне.

В [8, 10] 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.

В дальнейшем единое поле воздействующих сигналов и помех обрабатывается различными вариантами адаптивных и неадаптивных алгоритмов. Полученные результаты сравниваются между собой с позиции критериев — различий направлений прихода для обнаружения слабых пороговых сигналов и сильных многолучевых мешающих сигналов, выраженных в долях от полураствора характеристик направленности (ХН) используемых антенн. Поэтому основное внимание настоящего раздела посвящено анализу пересечения трасс самых слабых сигналов с наиболее сильными мешающими сигналами со сложной структурой, а также с сигналами меньшей интенсивности. Основная задача исследований — сужение зоны потери контакта со слабой целью при пересечении трассы

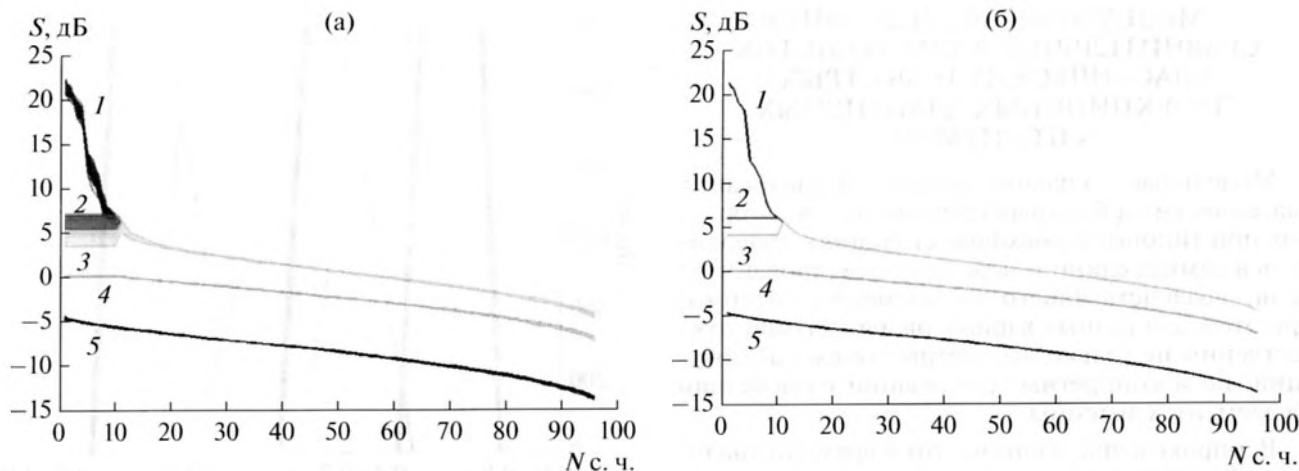


Рис. 2. Распределение собственных чисел: (а) индивидуальные реализации в группах, (б) средние значения по группам; 1 – первичные матрицы, 2 – собственные числа M_1 сильных сигналов приравнены к младшему из них, 3 – откорректированные матрицы CaronW, 4 – CaronPr, 5 – CaronOPT.

более сильного источника. Читателю необходимо быть готовым к кропотливому внимательному анализу близких по характеру рисунков, различающихся несколькими точками в окрестности пересечения трасс, где каждая новая точка продолжения трассы достигается с большим трудом.

2.1. Классические адаптивные алгоритмы

Дальнейший анализ заключается в модельном сравнении классического алгоритма Кейпона и его предполагаемых модифицированных вариантов в сложной помеховой ситуации с последующим сравнением с результатами быстрых проекционных алгоритмов.

Адаптация проводилась в 61 адаптивном поддиапазоне из 37 спектральных отсчетов, корреляционная матрица формировалась на $T = 12$ последовательных интервалах СА, так что объем адаптивной выборки составлял 444 при 96-элементной антенне, что удовлетворяет требованию “более $4L$ ”. Анализируются собственные числа в сформированной корреляционной матрице, и проводится их преобразование для реализации рассматриваемых модификаций алгоритмов. Затем строятся пеленгационные рельефы, и выявляются трассы всех сигналов с использованием классического алгоритма Кейпона, а также его модификации CaronOPT.

На рис. 2а представлены индивидуальные реализации распределения собственных чисел в 61 адаптивной группе на 12 такте СА, полученные с использованием соотношения (3) в 61 частотной адаптивной группе на 12 последовательных интервалах СА.

На рис. 2б представлены усредненные по адаптивным группам следующие семейства кривых:

- кривые 1 – распределение собственных чисел исходных корреляционных матриц, накопленных на 12 интервалах СА по 37 спектральных отсчетов;

- кривые 2 – в исходных матрицах M_1 старших собственных чисел приравнены к меньшему из них;

- кривые 3 – M_1 старших собственных чисел кривых 2 умножены на 0.64 (–2 дБ);

- кривые 4 – корреляционные матрицы накоплены после преобразования ортогональным проектором (11), после чего M_1 старших собственных чисел приравнены младшему из них;

- кривая 5 – корреляционная матрица сформирована суммированием 12 частных корреляционных матриц, оптимизированных согласно (5), (6).

Как видно из рис. 2а, формируются матрицы полного ранга, распределение собственных чисел достаточно стабильно в различных реализациях, так как каждая реализация строится с использованием 444 векторов размерности 96 (37 спектральных отсчетов на 12 интервалах СА, $4.625L$).

Пеленгационные рельефы строились с использованием 271 пространственных направлений наблюдения (пространственных каналов). На рис. 3 представлены сечения пеленгационных рельефов (в децибелах после нормировки на уровень фона), где (а) – алгоритм Кейпона, (б) – алгоритм CaronW, (в) – CaronPr и (г) – CaronOPT, на 12 интервалах СА. Из анализа рис. 3а следует, что для классического алгоритма Кейпона мощные отметки самых сильных сигналов (даже в логарифмическом масштабе) доминируют в пеленгационном рельефе. Отметки более слабых сигналов несут характер мелких деталей, что определяет трудность их обнаружения контрастными алгоритмами.

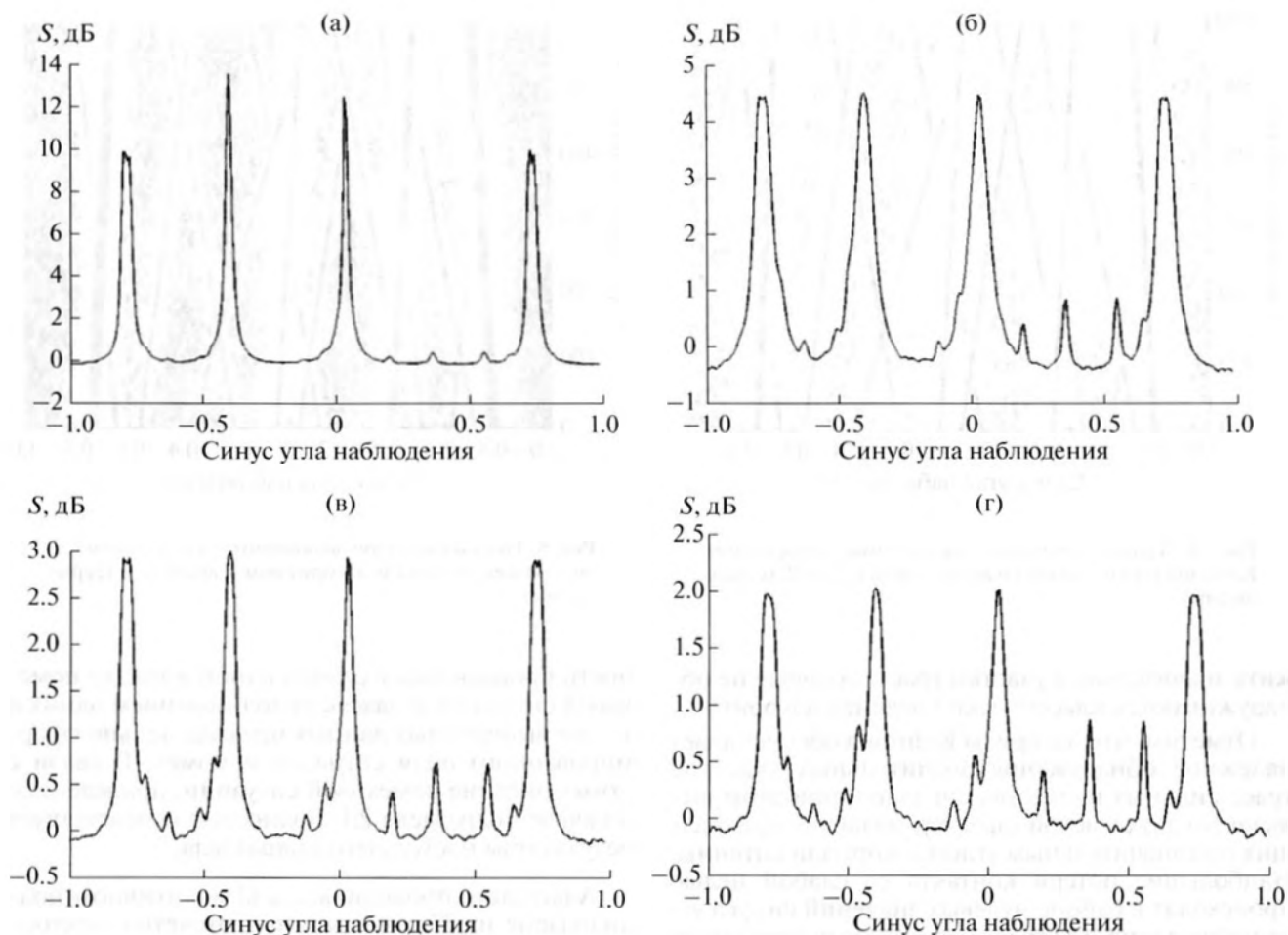


Рис. 3. Пеленгационные рельефы алгоритмов Кейпон (а), CaronW (б), CaronPt (в), CaronOPT (г).

В модифицированном алгоритме CaronW (рис. 3б) после резкого ослабления отметок сильных сигналов выделяются отметки как слабых сигналов, так и сигналов средней интенсивности. Это позволяет произвести более надежную их фиксацию с помощью алгоритмов, основанных на двустороннем пространственном контрасте.

Анализ рис. 3а и 3б показывает, что обнаружение сигналов с энергией в тысячи раз меньше энергии близких мощных сигналов сопряжено с большими сложностями их автоматического выделения на непрогнозируемом анизотропном фоне, обусловленном остатками подавленных сигналов и его флуктуациями. Заметим, что на рис. 3б заметно уширение отметки, обусловленное воздействием рассеянной компоненты сильных сигналов, накапливаемой на 12 последовательных интервалах СА.

На рис. 3в приведен пеленгационный рельеф, в котором при обработке проведена корректировка корреляционной матрицы с помощью ортогонального проектора (11) и дополнительно ослаблены сильные сигналы согласно кривой 4 на рис. 2.

Анализ рис. 3в и 3г показывает, что улучшилась заметность самых слабых источников звука, выделение которых становится возможным с помощью методов двустороннего пространственного контраста. Характер пеленгационных рельефов рис. 3в и 3г изменился по сравнению с пеленгационным рельефом рис. 3б: отметки сильных сигналов стали более узкими, что свидетельствует об ослаблении влияния рассеянных компонентов при обработке входных выборок ортогональным проектором и при оптимизации перед накоплением.

Перейдем теперь к анализу трасс, выделенных с помощью различных алгоритмов и их комбинаций. На рис. 4 представлены трассы, выделенные после обработки пеленгационных рельефов с периодом два интервала СА, так что трассы фиксируются только в 600 временных точках. Яркими линиями представлены трассы сигналов, обнаруженные классическим алгоритмом Кейпона, а серыми линиями — кривые, дополнительно выявленные алгоритмом CaronW. Результаты сравнения алгоритмов свидетельствуют о том, что модифицированный алгоритм позволяет обнару-

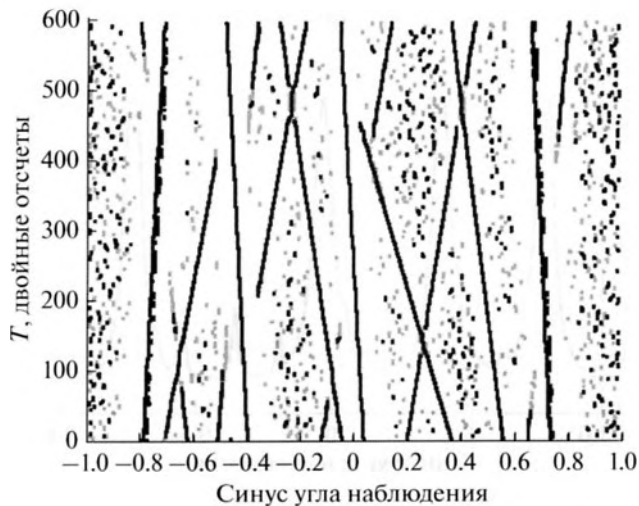


Рис. 4. Трассы сигналов, выделенные алгоритмом Кейпона (яркие линии) и алгоритмом CaponW (серые линии).

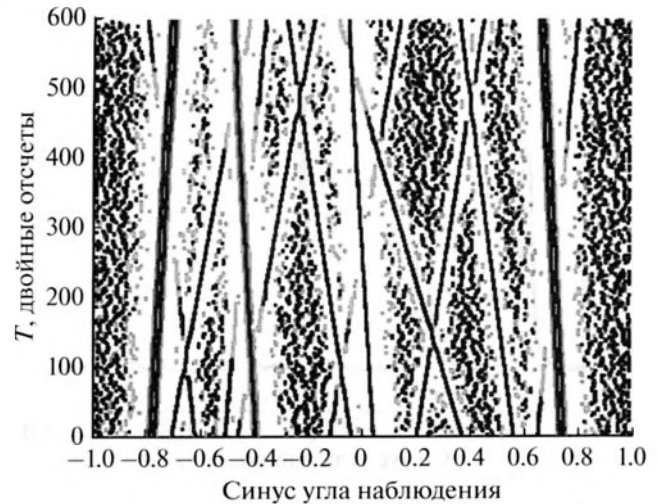


Рис. 5. Трассы сигналов, выявленные алгоритмом Capon (яркие линии) и алгоритмом CaponOPT (серые линии).

жить 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, приходящих под значительным углом к нормали антенны. Наибольшие потери контакта со слабой целью происходят в районе нулевых значений синуса угла наблюдения, где трасса слабой цели пересекает трассы трех более сильных источников.

На рис. 5 представлены трассы, выявленные алгоритмом Кейпона (яркие линии) и алгоритмом CaponOPT (серые линии). Применение этого алгоритма привело к существенному сужению зон потери контакта со слабыми сигналами при пересечении трасс как сильных сигналов, так и сигналов средней интенсивности.

Следует обратить внимание на существенное сужение зон потери контакта со слабой целью в окрестности нулевых значений синуса угла наблюдения.

Представленные результаты показывают, что при использовании классических адаптивных алгоритмов предварительная оптимизация весовых коэффициентов элементов коротких участков полноразмерных корреляционных матриц позволяет существенно ослабить неблагоприятное влияние быстрых флуктуаций рассеянного поля интенсивных локальных источников.

2.2. Быстрые проекционные адаптивные алгоритмы

Для сопоставления результатов, полученных с помощью классических и быстрых проекционных алгоритмов, исследования разрешающей способ-

ности проводились в рамках одной и той же помеховой ситуации, и даже с использованием одних и тех же выборочных данных предварительно сформированного поля сигналов и помех. В связи с этим описание помеховой ситуации, приведенное в начале подраздела 2.1, полностью соответствует результатам настоящего подраздела.

Адаптация проводилась в 61 адаптивном поддиапазоне из 37 спектральных отсчетов, вектора направления корректировались к среднему отсчету каждой адаптивной группы с помощью фокусирующих матриц [2]. Процедуры первого этапа адаптации реализовались на каждом интервале СА с последующим усреднением на втором этапе адаптации на $T = 12$ последовательных интервалах СА.

С учетом усреднения на 12 временных интервалах и использования 61 адаптивного поддиапазона общий объем выборки для построения пеленгационного рельефа составлял 27084 выборки размерности 96. Решение о первичном обнаружении сигналов для всех алгоритмов принималось автоматически алгоритмами, использующими методы двустороннего пространственного контраста. Предполагалось, что окончательное решение об обнаружении и оценке параметров будет принято по результатам вторичной обработки (которая в данной статье не рассматривается). Предметом анализа настоящего подраздела является модельная проверка результатов выявления сигналов и трасс наиболее слабых сигналов с помощью двух модификаций быстрых проекционных алгоритмов (10) и (12), а также сравнение этих результатов с результатами классического алгоритма Кейпона и оптимизированных модификаций этого алгоритма.

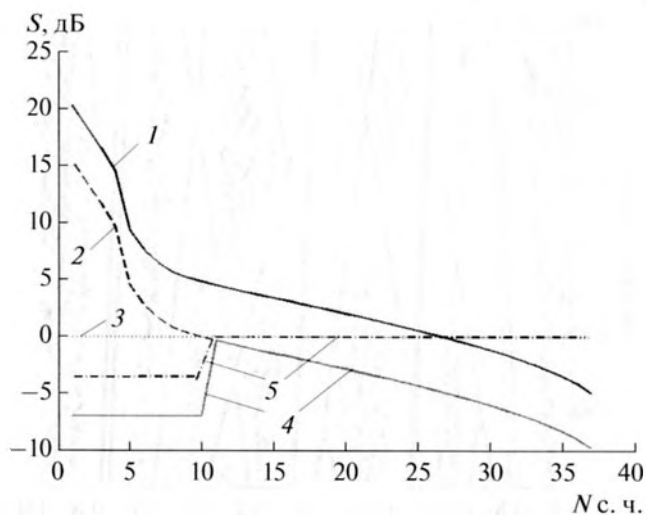


Рис. 6. Варианты исходного и модифицированного распределения собственных чисел 1 – исходное; 2 – смещенное исходное; 3 – равномерное; 4 и 5 – оптимизированное для обнаружения наиболее слабых сигналов согласно (6) и (7).

На рис. 6 представлены рассматриваемые модификации распределения собственных чисел на 12-м интервале СА. Кривые 1 характеризуют исходное распределение собственных чисел матрицы $X_i^{*T}(r)X_i(r)$, кривая 2 – смещенное распределение, полученное делением всех собственных чисел на значение собственного числа с номером M_1 (собственное число наиболее слабого из M_1 , выбранных как наиболее интенсивных). Кривая 3 характеризует распределение соотношения (11), кривая 4 – оптимизированное распределение (6), а кривая 5 – распределение (13). Как видно из рисунка, оптимизированное распределение собственных чисел отличается тем, что сильно уменьшены значе-

ния старших собственных чисел при сохранении (или усилении в (13)) относительных величин младших собственных чисел. Ортогональный проектор характерен равенством весовых коэффициентов при всех собственных векторах.

В отличие от варианта классических адаптивных алгоритмов, приведенных на рис. 2, при анализе быстрых проекционных алгоритмов для 96-элементной антенны формируются только 37 собственных чисел, при этом для ослабления влияния сильных сигналов уменьшаются 10 собственных чисел, соответствующих наиболее сильным сигналам.

Дальнейшие исследования заключаются в оценке пеленгационных рельефов и выявленных трасс всех сигналов с использованием неадаптивного алгоритма Бартлетта, адаптивного алгоритма (10), а также его оптимизированной модификации (12), с последующим сравнением с аналогичными классическими алгоритмами, рассмотренными в подразделе 1.1.

Пеленгационные рельефы строились с использованием 271 пространственных направлений наблюдения (пространственных каналов).

На рис. 7 представлены сечения пеленгационных рельефов в логарифмическом масштабе (алгоритмы (10) (а) и (12) (б)) на 12-м интервале СА. Из анализа рис. 7а следует, что для алгоритма (11) отметки самых слабых сигналов начинают проявляться в пеленгационном рельефе несколько лучше, чем в рельефе алгоритма Кейпона, приведенном на рис. 3а. Это обусловлено проведенной коррекцией собственных чисел (кривая 3 на рис. 6) в отличие от кривой 1 на рис. 2, которая используется для вычислений при реализации алгоритма Кейпона.

Напротив, в модифицированном алгоритме (рис. 7б) после резкого ослабления отметок сильных сигналов рельефно выделяются отметки как самых слабых сигналов, так и сигналов средней

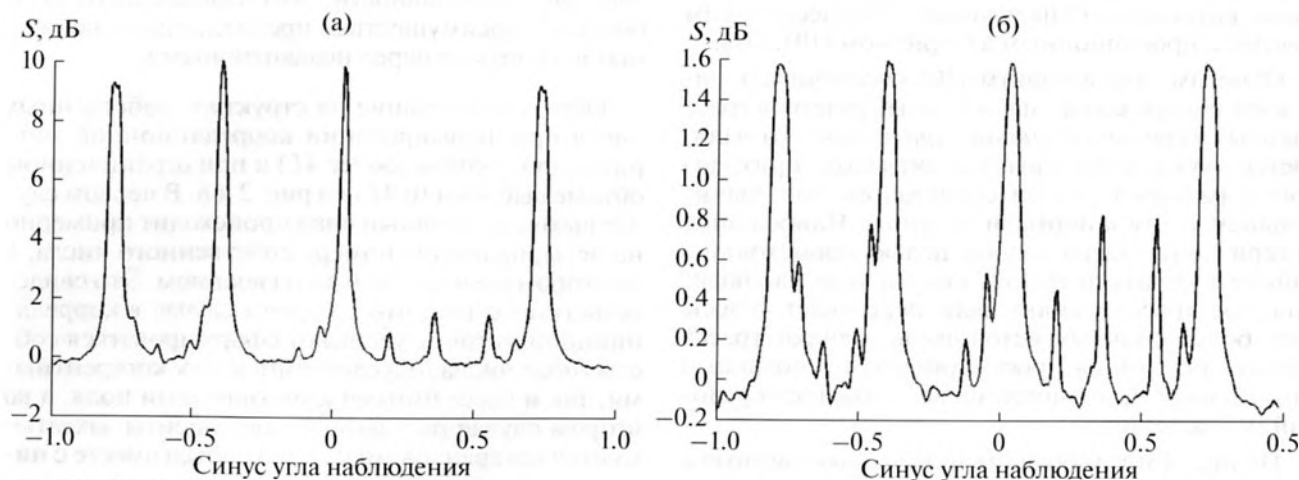


Рис. 7. Пеленгационные рельефы классического проекционного алгоритма (10) (а) и оптимизированного алгоритма (12) (б).

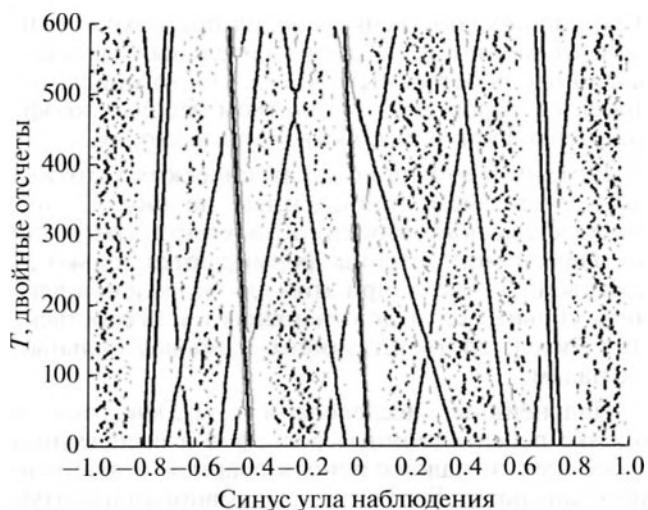


Рис. 8. Трассы сигналов, выделенные алгоритмом (10) (яркие линии) и алгоритмом (12) (серые линии) с использованием фокусирующих матриц.

интенсивности. Это позволяет произвести их надежную фиксацию с помощью алгоритмов, основанных на двустороннем пространственном контрасте, хотя сложности выделения слабых сигналов на анизотропном фоне остаются.

На рис. 8 представлены трассы, выделенные после обработки пеленгационных рельефов, с периодом два интервала СА. Яркими линиями представлены трассы сигналов, обнаруженные алгоритмом (10), а серыми линиями — кривые, дополнительно выявленные алгоритмом (12) с учетом реализации обработки фокусирующими матрицами. В конце раздела будет проведена количественная оценка ухудшения разрешающей способности за счет отсутствия фокусировки в приемном тракте.

Результаты сравнения алгоритмов свидетельствуют, что модифицированный алгоритм (12) позволяет обнаружить дополнительные участки трасс, которые не обнаруживаются классическим быстрым проекционным алгоритмом (10), (11).

Отметим, что алгоритм (10) обеспечивает надежное обнаружение значительных участков трасс сильных и средних сигналов, при этом четко выявляется двухлучевой характер сигналов, происходящих с разными углами скольжения под значительным углом к нормали антенны. Наибольшие потери контакта со слабой целью происходят в районе нулевых значений синуса угла наблюдения, где трасса слабой цели пересекает трассы трех более сильных источников, однако трасса слабого источника просматривается с помощью алгоритма (12), несмотря на все сложности условий наблюдения.

На рис. 4 представлены трассы, выявленные с помощью классического алгоритма Кейпона и его оптимизированной модификации CaponW,

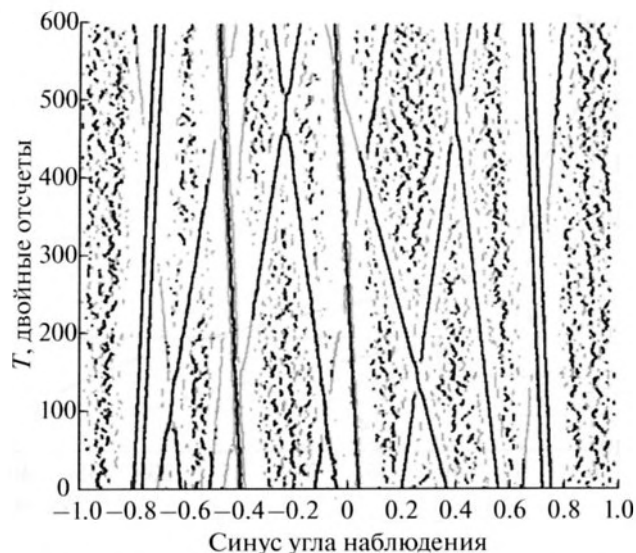


Рис. 9. Трассы сигналов, выявленные алгоритмом Бартлетта (яркие линии) и алгоритмом (12) (серые линии).

использующей аналогичную идеологию для классических алгоритмов, но без предварительной коррекции на коротких выборках. Сопоставление результатов рис. 4 и рис. 8 показывает, что быстрый проекционный алгоритм (10) дает сравнимые и даже более полные результаты по сравнению с классическим алгоритмом Кейпона.

Еще большие дополнительные участки трасс по сравнению с неадаптивным алгоритмом Бартлетта позволяет выявить оптимизированный алгоритм (12), что представлено на рис. 9. Как следует из анализа этого рисунка, алгоритмом Бартлетта обнаруживаются только небольшие участки трасс самых слабых сигналов, надежно обнаруживаются только наиболее сильные сигналы и сигналы средней интенсивности. Оптимизированный алгоритм позволяет выявить большие участки трасс самых слабых сигналов и улучшить разрешение сигналов средней интенсивности, что свидетельствует о больших преимуществах предлагаемых адаптивных алгоритмов перед неадаптивными.

Обратим внимание на структуру собственных чисел при формировании корреляционной матрицы при полном (более $4L$) и при ограниченном объеме выборки ($0.4L$) на рис. 2 и 6. В первом случае выход на плавный спад происходит примерно на четырнадцатом номере собственного числа, а во втором случае — только на восьмом. Это свидетельствует о том, что в первом случае в корреляционной матрице успевают сформироваться собственные числа, обусловленные как когерентными, так и рассеянными компонентами поля, а во втором случае рассеянные компоненты захватываются когерентными и ослабляются вместе с ними ортогональным проектором или оптимизационным алгоритмом.

Сводная таблица по обнаружению и разрешению слабых источников

| Алгоритм | № | Время потери контакта | Угловая зона потери контакта | Разрешение относительно полураствора ХН |
|-----------------------------|-------|-----------------------|------------------------------|---|
| Bartw | 1 | 822 | 0.1346 | 2.75 |
| Сарон (3) | Ф 2а | 546 | 0.089 | 1.58 |
| | ОФ 2б | 642 | 0.105 | 1.8 |
| СаронW (3) коррект. | Ф 3а | 488 | 0.082 | 1.35 |
| | ОФ 3б | 588 | 0.089 | 1.57 |
| СаронPr | Ф 4а | 364 | 0.066 | 1.05 |
| | ОФ 4б | 370 | 0.066 | 1.05 |
| СаронОПТ (5), (6) | Ф 5а | 339 | 0.053 | 0.83 |
| | ОФ 5б | 386 | 0.062 | 1.02 |
| Ортогональный проектор (10) | Ф 6а | 446 | 0.073 | 1.26 |
| | ОФ 6б | 464 | 0.076 | 1.3 |
| Проекционный ОПТ (12) | Ф 7а | 347 | 0.058 | 0.88 |
| | ОФ 7б | 395 | 0.066 | 1.09 |

3. ВЫВОДЫ

В таблице представлены данные по обобщенным результатам обнаружения слабых сигналов с помощью алгоритмов, рассмотренных в разделах 1.1 и 1.2, где приведены данные по следующим количественным параметрам, характеризующим качество гидроакустического наблюдения:

1) среднее время потери контакта при пересечении трассы сильного сигнала трассой слабой цели, измеренное в количестве интервалов СА;

2) средний диапазон синуса угловой зоны наблюдения, в пределах которого происходит потеря контакта со слабой целью при пересечении трассы сильной цели;

3) средний диапазон угловой зоны наблюдения от направления ближайшего луча (в долях от полураствора ХН), в которой происходит потеря контакта со слабой целью.

В таблице приведены названия рассматриваемых алгоритмов, а рядом, в скобках, номер формулы, по которой проводился расчет. Все порядковые номера вариантов с индексом “а” рассчитывались после корректировки выборок с помощью фокусирующих матриц, а с индексом “б” – без фокусировки. Как видно из результатов таблицы, худшие результаты по всем параметрам (время потери контакта 822 такта СА, угловая зона потери контакта 0.1346 изменения синуса угла наблюдения, разрешающая способность 2.75 полураствора ХН) обеспечивает неадаптивный алгоритм Бартлетта (№ 1), предварительная фокусировка в котором не влияет на результаты. Несколько лучшие харак-

теристики обеспечивает классический адаптивный алгоритм Кейпона № 2 – 546 тактов СА, 0.089 зона потери контакта, 1.58 полураствора ХН при использовании фокусировки (642 такта СА, 0.105 зона потери контакта и 1.8 полураствора ХН при отсутствии фокусировки). Дальнейшее улучшение характеристик приемного тракта проявляется при использовании специализированных адаптивных алгоритмов, оптимизированных для обнаружения слабых сигналов. Алгоритм СаронW (№ 3) после коррекции суммарной матрицы позволяет получить дальнейшее сужение зоны потери контакта – соответствующие параметры 488, 0.082 и 1.35 при наличии фокусировки (588, 0.089 и 1.57 при отсутствии фокусировки).

Модифицированный классический алгоритм СаронОПТ (№ 5) приводит к дальнейшему улучшению характеристик по сокращению времени потери контакта, угловой зоны потери контакта и разрешающей способности – 339, 0.053, 0.83 после фокусировки (386, 0.062 и 1.02 без фокусировки). Алгоритм СаронPr обеспечивает несколько худшие результаты.

Отметим, что использование фокусирующих матриц совместно с алгоритмом (10) (№ 6а в таблице), позволяет улучшить характеристики этого алгоритма по сравнению со случаем отсутствия фокусировки (№ 6б в таблице) на 5–10%. Быстрый проекционный алгоритм (10) на основе ортогонального проектора (11) обеспечивает характеристики несколько лучше, чем Кейпон и СаронW, но хуже классических алгоритмов, оптимизированных для приема слабого сигнала (№ 4 и 5).

Быстрый проекционный алгоритм (№ 7а и 7б), оптимизированный на прием слабых сигналов (12), обеспечивает характеристики, примерно эквивалентные классическим алгоритмам, оптимизированным на прием слабых сигналов. Отметим, что использование фокусирующих матриц при обработке алгоритмом (12) (№ 7а в таблице), позволяет существенно (на 15–20%) улучшить все параметры обнаружения и разрешения слабых сигналов по сравнению со случаем отсутствия фокусировки, приведенным в столбце под № 7б.

Подводя итог результатам проведенных модельных исследований, отметим, что в рассматриваемых весьма тяжелых условиях наблюдения при минимальном запасе помехоустойчивости (в поле распределенных помех 2–3 дБ) адаптивные методы позволяют весьма существенно улучшить результаты по обнаружению самых слабых сигналов.

Средняя угловая зона разрешения слабых сигналов алгоритмом Бартлетта составила 2.75 полураствора ХН на средней арифметической частоте рассматриваемого диапазона. Применение алгоритма Кейпона позволяет снизить эту величину до 1.58 полураствора, оптимизация накопленной матрицы в алгоритме Кейпона может понизить этот параметр до 1.35, близкое значение обеспечивает использование ортогонального проектора (№ 6 в таблице). Накопление секционированных групп корреляционной матрицы после их оптимизационной коррекции (5) и (6) позволяет снизить эту величину до уровня 0.85–0.9 от полураствора ХН, и примерно такие же результаты обеспечивает быстрый проекционный алгоритм (12) с оптимизационной коррекцией корреляционной матрицы.

При выбранных параметрах антенн и спектрального анализа и отсутствии фокусировки результаты разрешающей способности ухудшаются на 15–20%.

При пересечении трассы сильного сигнала сигналами средней интенсивности (присутствующими в ситуации на рис. 1), значительно сокращаются (до двух раз и более) время потери контакта, угловая зона потери контакта и разрешающая способность системы наблюдения по сравнению с этими параметрами для наиболее слабых сигналов.

Основной вывод выполненной работы заключается в том, что быстрый проекционный оптимизированный адаптивный алгоритм имеет весьма экономичные и удобные формы реализации и обеспечивает разрешение слабых сигналов, примерно эквивалентное применению классического алгоритма, оптимизированного для приема слабых сигналов. Этот алгоритм обеспечивает значительно лучшие характеристики по сравнению с неоптимизированными модификациями классического адаптивного алгоритма.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Capon J.* High resolution frequency–wavenumber spectral analysis // Proc. IEEE. 1969. V. 57. P. 1408–1418.
2. *Wang H., Kaveh M.* Focusing matrices for coherent signal subspace processing // IEEE Transaction Acoustic, Speech and Signal Processing. 1988. V. ASSP. 36. № 8. P. 1272–1281.
3. *Krim H., Viberg M.* Two decades of array signal processing research // IEEE Signal Processing Magazine 1996. № 7. P. 67–95.
4. *Леховицкий Д.Н., Атаманский Д.В., Кириллов И.Г.* Разновидности “сверхразрешающих” анализаторов пространственно–временного спектра случайных сигналов на основе обеляющих адаптивных решетчатых фильтров // Антенны. 2000. № 2(45). С. 40–54.
5. *Черемисин О.П., Ратынский М.В., Комов А.А., Пушкин А.Е.* Эффективный проекционный алгоритм адаптивной пространственной фильтрации // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39. № 2. С. 259–263.
6. *Ратынский М.В.* Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2004. 199 с.
7. *Караваев В.В., Сазонов В.В.* Статистическая теория пассивной локации. М.: Радио и связь, 1987. 240 с.
8. *Малышкин Г.С.* Анализ влияния физических и технических факторов на эффективность адаптивных алгоритмов обработки гидроакустических сигналов // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 3. С. 284–299.
9. *Малышкин Г.С., Шафранок Ю.В.* Адаптивный прием плосковолновых широкополосных сигналов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6. № 1. С. 66–77.
10. *Малышкин 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.
11. *Малышкин Г.С., Сидельников Г.Б.* Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов (обзор) // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 5. С. 526–545.
12. *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.
13. *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.
14. *Белецкий Ю.С.* Методы и алгоритмы контрастного обнаружения сигналов на фоне помех с априори неизвестными характеристиками. М.: Радиотехника, 2011. 429 с.