

ОБНАРУЖЕНИЕ ЭХО-СИГНАЛОВ С УЧЕТОМ МНОГОЛУЧЕВОСТИ ВОЛНОВОДА И МНОГООБЛИКОВОСТИ ОТРАЖАТЕЛЯ

© 2023 г. В. Н. Драченко^а, Г. Н. Кузнецов^{а, *}, А. Н. Михнюк^б

^аИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Россия

^бРоссийский университет дружбы народов (РУДН), ул. Миклухо-Маклая 6, Москва, 117198 Россия

*e-mail: skbmortex@mail.ru

Поступила в редакцию 30.03.2022 г.

После доработки 22.03.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

В шельфовой зоне выполнено экспериментальное исследование возможности повышения вероятности обнаружения эхо-сигналов на фоне помех в результате учета многолучевой модели волновода и конструктивных особенностей отражателя. Экспериментально обоснована возможность увеличения дальности сопровождения и уменьшения вероятности ложных тревог при использовании алгоритма, использующего продолжительность временного интервала, в течение которого наблюдается последовательность отраженных от одного отражателя сигналов в связи с многолучевостью распространения сигналов и многообликостью отраженного сигнала, если структура цели сложная и включает несколько разнесенных в пространстве отражателей. Даны рекомендации по выбору интервалов — длин реализации, в пределах которых возможно суммирование энергии отраженных сигналов. Показано, что в результате накопления мощности сигнала с использованием алгоритма, частично учитывающего модель эхо-сигнала, увеличивается время сопровождения цели и уменьшаются ложные тревоги.

Ключевые слова: модель многолучевого акустического канала, многообликость отражателя, обнаружение и сопровождение цели с использованием накопления мощности на интервале наблюдения отраженных сигналов, моделирование, эксперимент, уменьшение ложных тревог, увеличение дальности сопровождения

DOI: 10.31857/S032079192360049X, **EDN:** BWGFON

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в различных организациях выполняется разработка быстро развертываемых гидролокационных станций (ГЛС) обнаружения малоразмерных тел. Их назначение — охрана особо важных объектов, расположенных в прибрежных районах, и защита хозяйственных субъектов со стороны прилегающей акватории. Целевым назначением подобных комплексов является обнаружение несанкционированного проникновения к охраняемому объекту пловцов на ластах или средствах движения, а также обнаружение и сопровождение автономных необитаемых подводных аппаратов и подвижных морских роботов. Защищаемыми объектами могут быть промышленные, энергетические, хозяйственные, спортивные, военные и государственные объекты и учреждения, имеющие водные границы.

При обработке сигналов следует учитывать, что при работе гидролокатора в реальном морском волноводе эхо-сигналы, отраженные от обнаруживаемой цели, приходят на приемную антенну в виде совокупности лучей, параметры которых определя-

ются акустико-гидрологическими условиями распространения и свойствами отражателя. Оптимальный алгоритм обнаружения многолучевого эхо-сигнала соответствует обработке, согласованной с параметрами моделей излучаемого сигнала, волновода и отражателя, и учитывающей корреляционные свойства помехи. Такой алгоритм по существу сводится к взвешенному суммированию решающей статистики (РС) на выходе сформированного в пространстве углового канала, после чего выполняется согласованная фильтрация принятого сигнала с эталонной копией излучаемого сигнала. Число сумм определяется числом лучей эхо-сигнала, веса которых определяются амплитудами и фазами этих сигналов, а задержки — их относительными задержками в гидроакустическом канале. Данной проблеме за последние десятилетия посвящены ряд работ, среди которых можно выделить публикации [1–3], имеющие теоретическое значение. Обзор методов обработки сигналов с учетом многолучевой модели волновода для обнаружения и оценки координат источников представлен в [4]. В [5, 6] выполнено экспериментальное исследование и

анализ применения согласованной с передаточной функцией волновода обработки для повышения эффективности обнаружения и оценки координат источника в пассивном режиме с использованием буксируемой или стационарной векторно-скалярной антенны. В [7, 8] исследована помехоустойчивость обнаружения и эффективность оценки координат маломощных источников с использованием алгоритма оценки максимумов корреляционной функции широкополосных сигналов, распространяющихся в многолучевом волноводе.

Следует также особо отметить дополнительное влияние многобликовости цели, при которой каждый отражающий элемент создает свою суперпозицию лучей — эхо-сигналов, и которую также необходимо учитывать при обработке. Многобликовость создает из-за недостатка информации о размерах отражателя, его ориентации и направлении движения существенную неопределенность модели принятых сигналов и усложняет обработку. Некоторые вопросы влияния многобликовости исследованы в [9, 10]. В частности, отмечается, что даже при большом отношении сигнал/помеха затруднительно использовать многобликовую структуру эхо-сигналов для решения задачи классификации.

Отсюда следует, что реализация оптимального алгоритма, согласованного с локальными условиями распространения и со свойствами отражателя, и одновременно учитывающего свойства помех, требует точного знания лучевой (или модовой) модели поля и аналитического представления многобликовой частотно-угловой структуры индикатрисы рассеяния цели. Причем эти данные необходимы “здесь и сейчас” — на момент решения задачи обнаружения, т.е. в реальном времени, что практически невозможно при непрерывном изменении условий приема сигналов, отраженных от движущейся цели, и сводит “на нет” возможные преимущества согласованной обработки. В таких условиях представляется полезным использовать квазисогласованные (квазиоптимальные) алгоритмы обработки, частично учитывающие модели сигнала и отражателя — такие “загрубленные” алгоритмы обычно бывают более устойчивыми к изменению характеристик эхо-сигналов и помех и не требуют детального знания передаточной функции волновода в точке приема сигналов.

2. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ГЛС

Перечисленные выше малоразмерные объекты наблюдения являются малозумными, а их обнаружение и сопровождение необходимо производить в шельфовой зоне, для которой характерно наличие многочисленных локальных источников помех и отражателей. В связи с этим было принято решение о необходимости использования ГЛС, обеспечивающих освещение подводной обстановки и обнаружение целей в актив-

ном режиме. Этим определяются технические требования к ГЛС — по назначению и свойствам:

- системы освещения подводной обстановки должны включать ГЛС кругового или секторного обзора, предназначенные для работы в различных акваториях и построения в этих акваториях зон контроля заданной геометрии с размещением в этой зоне одной или нескольких однотипных станций;
- излучаемые и обрабатываемые сигналы должны иметь максимально возможную ширину рабочей полосы частот для уменьшения реверберационных помех, повышения точности целеуказания и снижения требуемой мощности зондирующего сигнала;
- ГЛС должны обладать направленностью приемных и излучающих антенн для эффективного подавления окружающих шумов и реверберационной помехи (ложников);
- минимальные энергопотребление и габариты каждой ГЛС, максимальная простота и быстрота постановки и подъема на акватории, минимизация стоимости и требований к плавсредствам технического обеспечения;
- использование стандартного интерфейса Ethernet для передачи данных целеуказания на верхний уровень охранного комплекса.

В исследованном далее макете ГЛС учитываются эти требования и используются: а) излучающая антенна в виде линейной вертикальной антенной решетки, формирующей направленное в вертикальной плоскости и ненаправленное излучение в горизонтальной плоскости, и б) приемная антенна — цилиндрическая многоканальная антенная решетка, обладающая небольшой направленностью в вертикальной плоскости, но формирующей в горизонтальной плоскости веер узких стационарных характеристик направленности, одновременно принимающих отраженные сигналы со всех горизонтальных направлений. Совокупная вертикальная и горизонтальная направленность уменьшают влияние распределенных морских шумов и реверберационной помехи, а также обеспечивают возможность непрерывного наблюдения во всей зоне обзора. Как следствие, производится обнаружение, пеленгование и сопровождение целей.

В 2010 г. была принята модульная архитектура приемного тракта, которая позволила создать линейку однотипных станций-модулей “Тритон” с различными приемными апертурами и разным числом приемных элементов — 64, 96 и 128. Фотографии¹ установленных на штативах станций “Тритон-64” и “Тритон-128” приведены на рис. 1. Диапазон рабочих частот 60–90 кГц, диаметр из-

¹ На 3-м международном форуме “Морская индустрия России” в 2013 г. НЦВИ ИОФРАН за малогабаритные гидроакустические модули “Тритон” был награжден золотой медалью в номинации “Научные исследования и изыскания”.

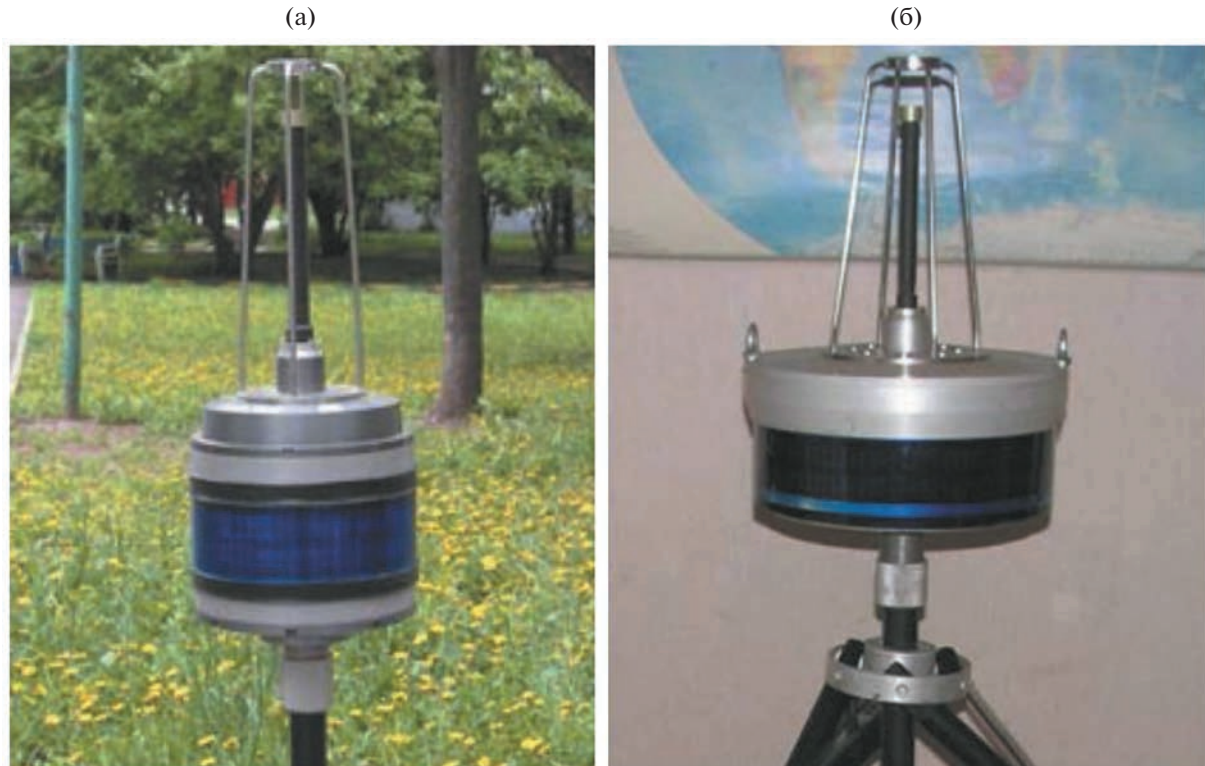


Рис. 1. Фотографии ГЛС, включающих вертикальную линейную излучающую антенну и цилиндрическую многоканальную приемную антенну: (а) – “Тритон-64” и (б) – “Тритон-128”.

лучателя 2 см, диаметр приемных антенн от 21 до 32 см, высота излучающих антенн около 20 см и приемных – около 10 см.

3. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ

Алгоритмы обработки эхо-сигналов разработаны применительно к макетам “Тритон-64” и “Тритон-128”. В качестве исходных данных приняты модели сигналов и помех, характеристики которых изложены ниже. Модель принимаемых ГЛС сигналов имеет вид:

$$p(\mathbf{r}_s, t) = \varepsilon p_T(\mathbf{r}_s, t) + p_N(\mathbf{r}_s, t), \\ s = 1, \dots, N_R, \quad t \in (0, T),$$

где $p(\mathbf{r}_s, t)$ – измеренное приемной антенной распределение давления в точках $\mathbf{r}_s$, которое складывается из $p_N(\mathbf{r}_s, t)$ – давления поля помехи, состоящей из шумов окружающей среды, реверберации и приведенных по входу шумов аппаратуры, $p_T(\mathbf{r}_s, t)$ – давление поля эхо-сигнала ($\varepsilon = 0$, когда отражателя нет, и $\varepsilon = 1$, когда отражатель присутствует), N_R – число преобразователей в приемной антенне, T – время наблюдения.

Поле эхо-сигнала определяется функцией Грина морского волновода, параметрами излучающей антенны, формой зондирующего сигнала и, кроме того, объемной индикатрисой рассеяния отражателя:

$$p_T(\mathbf{r}_s, \omega) = \sum_{\mu=1}^M \sum_{\mu'=1}^{M'} A_{\mu}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T) A_{\mu'}(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S) \times \\ \times \exp \left\{ i\omega \left[(1 + \beta^{(R)}) t_{\mu}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_T) + (1 + \beta^{(S)}) t_{\mu'}(\mathbf{r}_T, \mathbf{r}_S) + i \frac{1 + \beta^{(R)}}{c} (\mathbf{e}_{\mu}^{(R)}, \mathbf{r}_r - \mathbf{r}_R) \right] \right\} \times \\ \times \frac{R_T(\mathbf{e}_{\mu}^{(T)}, \mathbf{e}_{\mu'}^{(T)}, \omega)}{2} \mathbf{P}_S(\omega, \mathbf{e}_S - \mathbf{e}_{\mu'}^{(S)}) S(\omega(1 + \beta^{(\Sigma)})) \sqrt{\frac{W \rho c \gamma_S}{4\pi}}, \quad (1)$$



Рис. 2. Блок-схема алгоритма обработки сигналов в ГЛС.

где M и M' — число лучей, соединяющих фазовые центры излучающей и приемной антенны с точкой $\mathbf{r}_T$, где находится отражатель, $A_\mu, A_{\mu'}, t_\mu, t_{\mu'}, \mathbf{e}_\mu^{(R)}, \mathbf{e}_\mu^{(T)}, \mathbf{e}_\mu^{(S)}, \mathbf{e}_\mu^{(T)}$ — параметры этих лучей, а $R_T(\mathbf{e}_\mu^{(T)}, \mathbf{e}_\mu^{(T)}, \omega)$ — эквивалентный радиус отражателя в зависимости от направления падения $\mathbf{e}_\mu^{(T)}$ и рассеяния $\mathbf{e}_\mu^{(T)}, \beta^{(R)}, \beta^{(S)}, \beta^{(Z)}$ — доплеровские параметры.

Вектор-функцию $p_N(\mathbf{r}_s, t)$, описывающую помехи, будем считать распределенной по нормальному закону с нулевым средним и с некоторой пространственно-временной корреляционной матрицей $K_N(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_s, t, t')$, которая является суммой матриц, определяемых суперпозицией помех. Далее при разработке алгоритма обработки сигналов использовались модели помех, описанные в [5, 6], и в данной работе они не обсуждаются.

Обработку принимаемых ГЛС сигналов, которая реализует обнаружение и оценку параметров движущихся объектов с использованием выражений (1)–(3), можно условно разбить на этапы предварительной, первичной и вторичной обработки (рис. 2). К предварительной обработке (рис. 2, 1) обычно относят аналоговую фильтрацию и усиление принятых сигналов, аналого-цифровое преобразование и цифровую полосовую фильтрацию с децимацией. На этапе первичной обработки (рис. 2, 2) происходят формирование характеристик направленности, фильтрация,

согласованная с формой зондирующего сигнала, и обнаружение первичных отметок цели. К вторичной обработке (рис. 2, 3) относят траекторную фильтрацию и классификацию.

В работе далее исследуется этап обнаружения отметок цели, так как именно на данном этапе более всего сказывается многолучевость и многобликовость. Индикаторный процесс (ИП) определяется массивом $I(u, n) = |q_u(t_n)|, n = 1, \dots, N_t, u = 1, \dots, N_u$, а каждая ячейка $(\Delta\varphi, \Delta t)$ — элементом пространственного разрешения (ЭПР). Для обнаружения отметок выполняется селекция движущейся цели [11], т.е. в каждом ЭПР на выходе первичной обработки формируется текущее значение отношения сигнал–помеха (ОСП), которое автоматически корректируется в процессе работы станции. Для данного ЭПР и в данный момент времени величина ОСП формируется следующим образом:

- с помощью экспоненциального фильтра для каждого момента времени p вычисляются матожидания ИП и его среднеквадратичные отклонения:

$$\begin{aligned} \bar{I}_p(u, n) &= \left(1 - \frac{1}{N_p}\right) \bar{I}_{p-1}(u, n) + \frac{1}{N_p} I_p(u, n), \\ \bar{I}_p^2(u, n) &= \left(1 - \frac{1}{N_p}\right) \bar{I}_{p-1}^2(u, n) + \frac{1}{N_p} I_p^2(u, n), \\ \sigma_p(u, n) &= \sqrt{\bar{I}_p^2(u, n) - \bar{I}_p^2(u, n)}. \end{aligned} \quad (2)$$

• отношение разности значения индикаторного процесса в этом ЭПР и его математического ожидания и является текущим значением ОСП, которое сравнивается с заданным порогом:

$$\frac{I_{p+1}(u, n) - \bar{I}_p(u, n)}{\sigma_p(u, n)} > K. \quad (3)$$

Если выполняется верхнее неравенство, отметка считается обнаруженной. В этих выражениях N_p — число циклов, за которое происходит оценка параметров, K — пороговое ОСП, вычисляемое из вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги.

4. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МНОГОЛУЧЕВОСТИ И МНОГОБЛИКОВОСТИ НА ОТКЛИК АНТЕННЫ

Для первичной обработки на практике обычно используется известный алгоритм Бартлетта [5, 6] с формированием в горизонтально-вертикальной плоскости веера характеристик направленности. На выходе этого алгоритма для выделения (обнаружения) отраженных сигналов, превышающих заданный порог, в каждом ЭПР устанавливаются динамические пороги. В результате при стандартной обработке учитывается только наиболее энергонесущий луч, дающий максимальный отклик в решающей статистике. Естественно, подобная обработка существенно проигрывает оптимальной.

Ниже рассматривается вариант построения алгоритма частично согласованной обработки, учитывающей из набора различных характеристик передаточной функции волновода [2, 6] лишь диапазон возможных значений задержек приходов сигналов по отдельным лучам, а из характеристик цели — возможное пространственное разнесение отдельных отражателей, каждый из которых создает “семейство” отраженных сигналов в виде лучевых структур, в совокупности формирующих многобликовый сигнал.

Для построения алгоритмов с использованием суммарной энергии предварительно исследуем экспериментальные данные, полученные в контролируемых условиях, когда число отражателей известно. С этой целью рассмотрим характеристики эхо-сигналов от известных отражателей, которые отличаются возможностью формировать многобликовый эхо-сигнал. Это позволяет сравнить результаты обработки экспериментальных данных от различных отражателей и дать соответствующие рекомендации.

На рис. 3 показаны отрезки индикаторного процесса (ИП) в стационарном угловом горизонтальном канале приемной антенны, полученные в трех последовательных циклах локации при движении на удаление простейшего имитатора

цели — стандартного уголкового отражателя с длиной ребра 10 см. При этом имитатор облучался вертикально ориентированным излучателем, но при движении не выходил из стационарной характеристики направленности, сформированной приемной горизонтальной цилиндрической антенной. В этих условиях в угловом канале приемной антенны выполняется обработка последовательных групп отраженных от имитатора лучей, сформированных в вертикальной плоскости. Эти лучи (сигналы) приходят в точку приема с различными задержками и образуют пакеты импульсов, разнесенных на оси времени.

Учитывая простую конструкцию уголкового отражателя и существование в каждом направлении единственной отражающей зоны, можно утверждать, что на этом рисунке состав пакета сигнальных пиков и его изменчивость обусловлены не многобликовостью, а только многолучевостью.

На рис. 4 приведены отрезки ИП в угловом канале, полученные в трех последовательных циклах локации при движении более сложного отражателя — автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), движущегося под углом около 40–45 градусов к направлению, соединяющему источник эхо-сигналов и отражатель.

Видно, что количество пиков и расстояния между ними существенно увеличились. В этой структуре откликов кроме многолучевости проявляется и многобликовость, которая приводит к дополнительным задержкам и увеличению числа отраженных сигналов — и, как следствие, увеличению общей длительности отраженного сигнала. Естественно, что при усложнении конструкции и протяженности имитатора и увеличении числа разнесенных в пространстве отражателей возрастает количество отраженных импульсов, а из-за разнесения в горизонтальной плоскости локальных отражателей возрастет общая временная протяженность волнового (сигнального) пакета.

Из сравнения результатов, представленных на рис. 3 и 4, видно, что длительности отраженного импульса и пакета группы импульсов хорошо согласуются с исходными данными о конструкции и протяженности отражателей. Ранее возможность идентификации целей и оценки горизонтального размера отражателя по длительности отраженного сигнала отмечалась в [9, 10].

Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что учет при обработке даже максимального пика из всех наблюдаемых использует лишь часть энергии эхо-сигнала, отраженного от цели. Более полная энергия и отношение сигнал/помеха определяются суммарной энергией суперпозиции лучей с учетом многолучевости и вероятной многобликовости. Сложение энергии пришедших по разным лучам сигналов, отраженных раз-

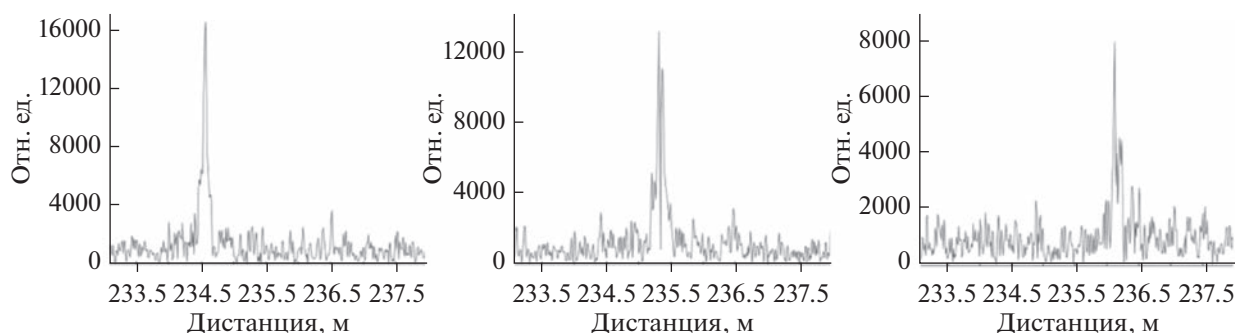


Рис. 3. Отрезки индикаторного процесса в “угловом” канале, уголкового отражателя.

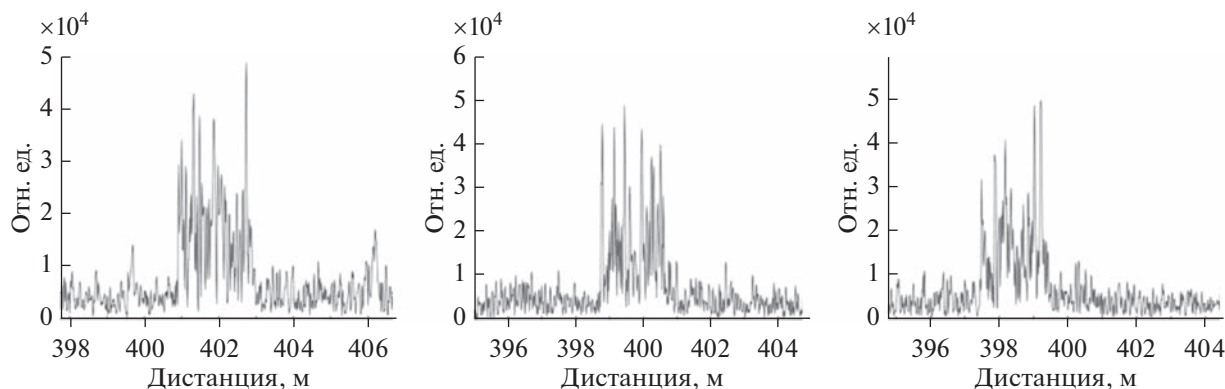


Рис. 4. Отрезки индикаторного процесса в угловом канале для АНПА длиной 3 м.

несенными в пространстве локальными отражателями, и их совместный учет должны увеличить отношение сигнала/помеха и, соответственно, дальность обнаружения.

5. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ

Решающая статистика (РС) при стандартной обработке представляет собой в каждом угловом канале выход фильтра, согласованного с формой излучаемого сигнала. Как известно [3, 12–15], выход согласованного фильтра пропорционален оценке амплитуды принятого эхо-сигнала. В случае разрешения во временной области приходов сигналов по разным лучам значения максимумов отдельных пиков в РС будут пропорциональны амплитудам этих сигналов (лучей).

В ЭПР, содержащем эхо-сигнал цели, значение РС будет определяться суммой помеховой и сигнальной составляющих. Тогда на основании (3) для оценки значения ОСП по амплитуде сигнала на выходе первичной обработки можно записать:

$$\rho = (U_i - \bar{U}_{in}) / \sigma_{in}, \quad (4)$$

где U_i — экспериментальное значение РС в i -м ЭПР, $\bar{U}_{in}$ — математическое ожидание и σ_{in} — экспериментальное среднее квадратичное отклонение (СКО) помехи в этом же ЭПР.

Величина ρ является экспериментальной оценкой ОСП на выходе алгоритма первичной обработки. Поскольку временные разбеги лучей и отдельных бликов от одиночной цели не велики, можно сделать предположение, что на этом интервале математическое ожидание и СКО пространственного отклика, обусловленного помеховой составляющей, стационарны или изменяются незначительно. Тогда суммарное ОСП по всем приходам (пикам) полезного эхо-сигнала по аналогии с (4) можно записать как

$$\rho = \sum_{j=1}^K (U_j - \bar{U}_n) / \sigma_n, \quad (5)$$

где K — количество выделенных сигнальных пиков.

Для примера рассмотрим семейство рабочих характеристик обнаружителя в активном режиме, приведенное на рис. 5. Данные графики рассчитаны в предположении, что помеха распределена по закону Рэлея с параметром масштаба $\sigma = 1$, а сигнал (отклик на эхо-сигнал) распределен по за-

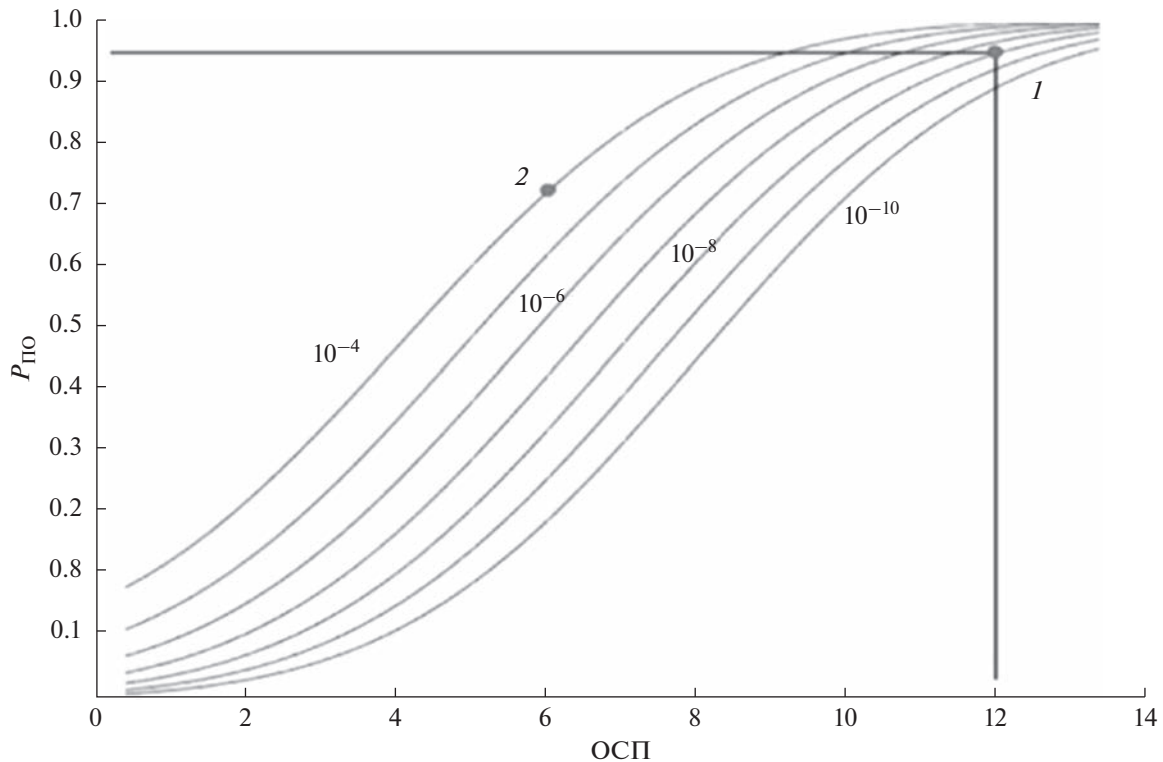


Рис. 5. Рабочие характеристики гидролокатора. Требования к эффективности обнаружения обозначены точками.

кону Райса с параметрами $\sigma = 2$ и ν , изменяющимся в соответствии со значением ОСП [12–14].

Например, требуется разработать ГЛС и алгоритм, обеспечивающие вероятность правильного обнаружения $P_{по} = 0.95$ при вероятности ложной тревоги $P_{лт} = 10^{-8}$. Тогда из графиков на рис. 5 получаем необходимую величину порогового отношения сигнал/помеха $\rho_0 = 12$ (точка 1). Предположим, что в строке по времени возможной задержки между пиками ИП будут обнаружены два пика с ОСП, равными $\rho_1 = 6$. Тогда, как видно из рис. 5, для каждого из этих пиков вероятность правильного обнаружения $P_{по}^0 = 0.73$ при вероятности ложной тревоги $P_{лт}^0 = 10^{-4}$, что явно недостаточно (точка 2).

Полагая, что обнаруженные пики — это составляющие двух эхо-сигналов, отраженных от одной цели, мы имеем право суммировать их мощности для получения мощности суммарного сигнала. Тогда, учитывая введенное ранее определение ОСП, для результирующего ОСП будем иметь значение $\rho_0 = 12$. Поскольку обнаружение каждого пика является независимым событием, то для вероятности ложной тревоги совместного события имеем $P_{лт} = P_{лт1}^0 * P_{лт2}^0 = 10^{-8}$. А вероятность правильного обнаружения при ОСП $\rho_0 = 12$

равна 0.95. Таким образом, мы удовлетворили исходным требованиям по вероятностям правильного обнаружения и ложной тревоги.

С учетом изложенного выше сформулируем эвристический квазиоптимальный алгоритм обработки, обеспечивающий групповую обработку нескольких разрешающихся эхо-сигналов с учетом наиболее вероятной ориентации движущегося отражателя.

1. Порог обнаружения ρ_0 задается стандартно — исходя из условия достижения требуемых значений вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги.

2. Исходя из практических соображений, учитывая условия распространения и вероятные конструктивные характеристики целей, задаем диапазон интервалов между задержками по времени Δt . Далее на этой основе рассчитываем соответствующий диапазон интервалов дистанций ΔR для независимых приходов эхо-сигналов по лучам.

3. Задаем величину начального порога обнаружения $\rho_1 < \rho_0$, что резко увеличивает вероятность ложных тревог.

4. На скользящем пространственно-временном окне ΔR находим значения пиков ИП, превышающих начальный порог $U_{i\max} \geq \rho_1$ и вычис-

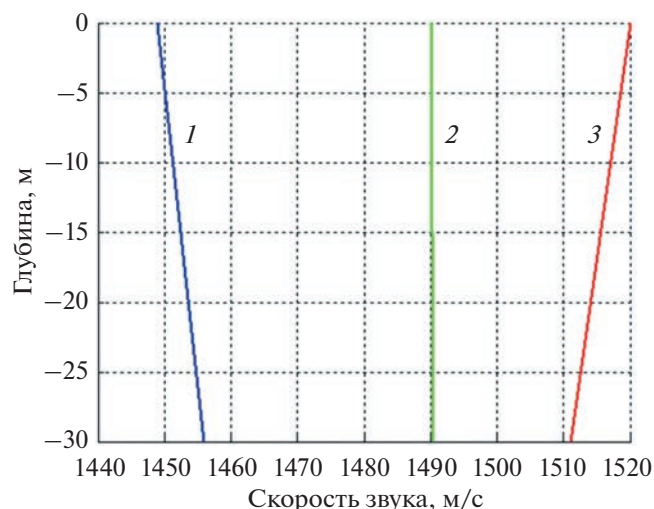


Рис. 6. ВРСЗ, для которых выполнялись расчеты.

ляем их сумму ρ , которая повторно сравнивается с требуемым порогом ρ_0 .

5. При превышении суммарным значением сигнала заданного порога ρ_0 определяется дистанция до обнаруженной цели — по одному пику с использованием его максимального значения или по средневзвешенному значению суммы всех пиков, превысивших пороги обнаружения ρ_1 и ρ_0 . При этом подавляются ложные тревоги.

Таким образом, для квазиоптимального алгоритма необходимы предварительные расчеты лучевой структуры с целью оценки только вероятных временных интервалов между временами прихода сигналов по разным лучам — при отражении одним или несколькими отражателями. При этом ни угловые и временные спектры, ни амплитудно-фазовые характеристики сигналов, пришедших по разным лучам, не рассчитываются и не используются. В этом принципиальное отличие предлагаемого алгоритма от алгоритма согласованной фильтрации [1–4]. Корреляционная обработка применяется только для сличения отраженных сигналов с излучаемым эталонным сигналом. Для максимального учета моделей сигналов и помех рекомендуется использовать выражения (1)–(3).

6. РАСЧЕТ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ НАКОПЛЕНИЯ МОЩНОСТИ СИГНАЛА

Рассмотрим результаты расчетов задержек между эхо-лучами для морского волновода глубиной 30 м в зависимости от дистанции до подводного объекта. Указанная глубина постановки рекомендуется для данной разновидности ГЛС и мониторинга прибрежных зон. Расчеты выполне-

ны для трех вариантов вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) в районе работ (рис. 6): 1) температура у поверхности 0°C , у дна 5°C (зимние условия); 2) температура не зависит от глубины и равна 10°C (отдельные месяцы весной и осенью); 3) температура у поверхности 24°C , у дна 10°C (летние условия). При всех расчетах глубины ГЛС и отражателя равны половине глубины волновода. Из полученных результатов на рис. 7 видно, что величины задержек между лучами зависят от номера луча, дистанции до отражателя и различаются при различных ВРСЗ. Однако возможные интервалы изменения задержек не превышают 3–4 мс для всех трех рассмотренных вариантов ВРСЗ. Для оценки зависимости интервала задержек от глубины волновода выполнены также расчеты для ВРСЗ № 2 при глубинах 20 и 10 м (рис. 8). Из результатов расчетов видно, что с уменьшением глубины волновода интервал возможных задержек между эхо-лучами также уменьшается.

Приведенные выше результаты соответствуют простому (одиночному) отражателю. Результирующий эхо-сигнал от многобликового объекта представляет собой сумму эхо-сигналов от отдельных бликов — одиночных разнесенных отражателей.

Для примера рассмотрим простейшие сложные отражатели, состоящие из двух, разнесенных на 5 м, или трех простых отражателей, разнесенных на 2.5 и 5 м. На рис. 9 изображены задержки эхо-лучей от первого (ближайшего) отражателя (кривые 1) и от второго удаленного на 5 м (кривые 2). Кривые 3 соответствуют задержке от третьего отражателя, расположенного между первым и вторым на расстояниях 2.5 м. Видно, что расширение интервала задержек эхо-лучей от сложного отражателя соответствует формуле $\Delta t_L = 2L/c$, где L — радиальный (продольный) размер объекта, c — скорость звука.

7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА

На рис. 10 приведены индикаторные процессы, полученные расчетным путем согласно (4) и (5). Данные результаты рассчитаны на основании анализа эхо-сигналов при движении одиночной цели — малогабаритного подводного аппарата (см. рис. 4).

Индикаторный процесс, приведенный на рис. 10б, получен при следующих параметрах предлагаемого алгоритма: $\rho_0 = 10$, $\rho_1 = 5$, $\tau = 2$ мс (или $\Delta R = 1.5$ м). Из рисунка следует, что ОСП, соответствующее эхо-сигналу, полученному с помощью частично согласованного (квазиоптимального) алгоритма, — ОСП = 55, т.е. увеличи-

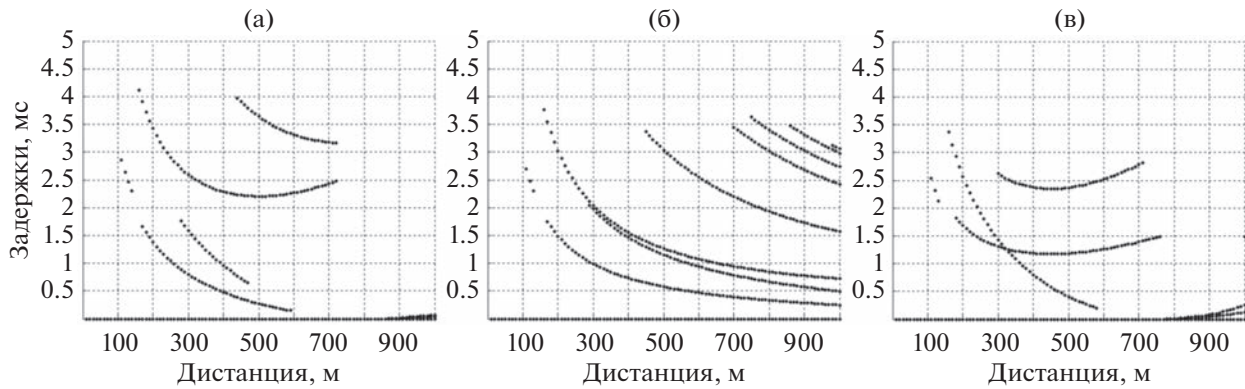


Рис. 7. Величины задержек между лучами при трех типах ВРСЗ: (а) – № 1, (б) – № 2 и (в) – № 3.

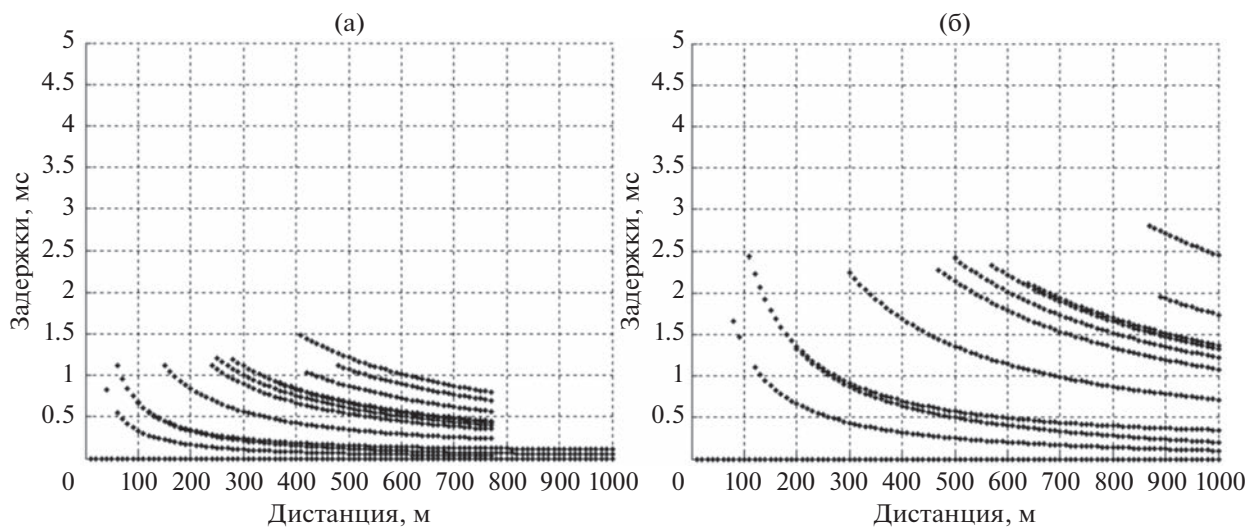


Рис. 8. Интервалы задержек в точке приема между временами прихода по разным лучам сигналов при глубинах волновода (а) – 20 м и (б) – 10 м. Один отражатель.

лось более чем в 4 раза по отношению к ОСП, полученному стандартным методом по одиночным пикам – $ОСП = 12$ (рис. 10а).

На рис. 11 приведены результаты, полученные при использовании предлагаемого частично согласованного алгоритма при обработке экспериментальных записей с приемной антенны ГЛС (рис. 1) обнаружения малоразмерных объектов [15]. Результаты получены при движении в зоне обзора малогабаритного АНПА или буксировке углового отражателя при сложности используемого зондирующего сигнала $B = \Delta FT = 600$. На этих графиках представлены зависимости ОСП отметок, обнаруженных и идентифицированных как отметки цели и отнесенных к соответствующей траектории – в зависимости от номера цикла локации (времени) в трех разных экспериментах. Кривые 1 соответствуют зависимостям, полученным по разработанному квазиоптимальному ме-

тоду, кривые 2 – получены по стандартному алгоритму (по одиночному пику). Обработка выполнялась с использованием следующих параметров: для (а, б) $\rho_0 = 15$, $\rho_1 = 7.5$, $\tau = 2$ мс; для (в) – $\rho_0 = 10$, $\rho_1 = 5.6$, $\tau = 2$ мс.

Графики на рис. 11а и 11б относятся к разным галсам АНПА. График на рис. 11в (кривая 2) получен при протяжке малогабаритного углового отражателя.

Как видно из этих графиков, во всех случаях среднее значение ОСП существенно возрастает, а количество пропусков цели уменьшается, если использовать квазиоптимальный алгоритм, частично учитывающий свойства модели сигнала.

Отметим, что на рис. 11а нет увеличения длительности сопровождения цели, поскольку на всех этапах этой обработки – по всем даже одиночным достаточно мощным эхо-сигналам отражатель уверенно обнаруживался и сопровождался

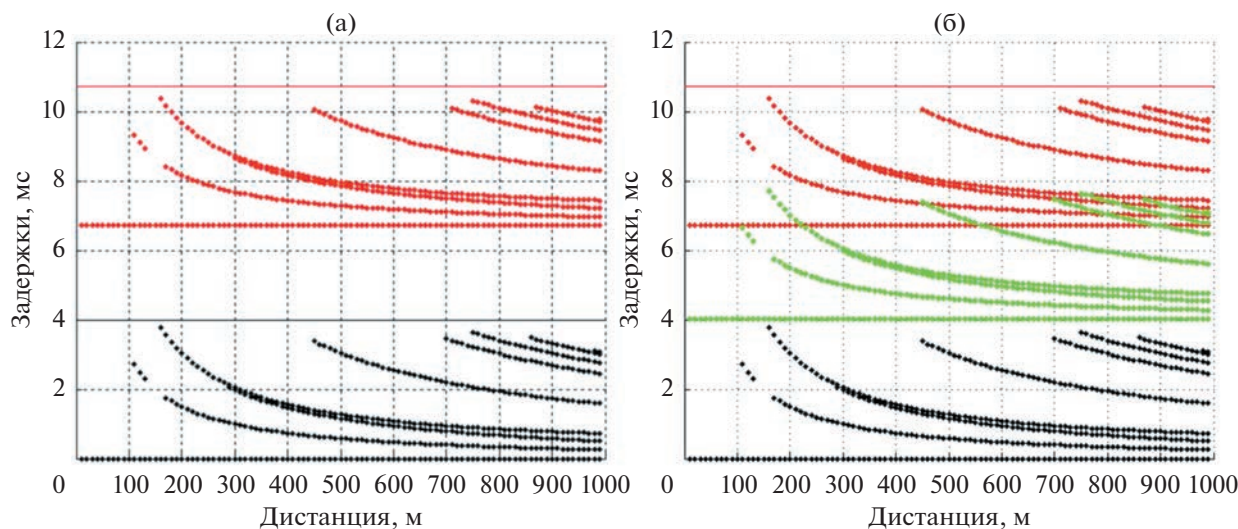


Рис. 9. Задержки между временами прихода в одном и том же волноводе при использовании двойного и тройного отражателей, размещенных на одном движущемся объекте (ВРСЗ № 2, глубина моря 30 м).

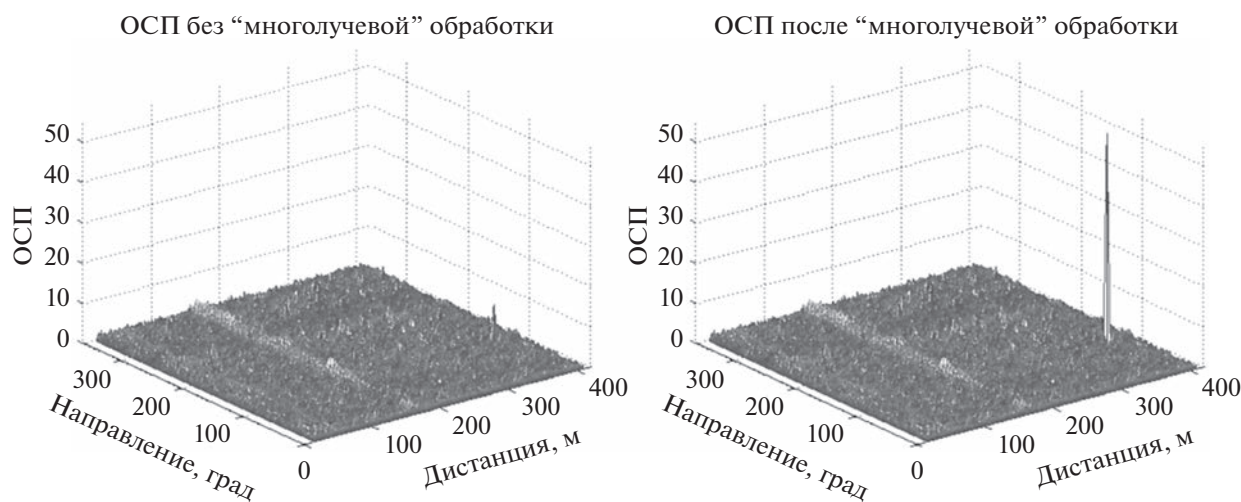


Рис. 10. Изображения индикаторного процесса, полученные (а) – стандартным методом и (б) – при использовании квазиоптимального алгоритма.

от входа в зону обнаружения до выхода из нее. Но на рис. 11б при его движении на удаление и, соответственно, уменьшении ОСП хорошо видно увеличение дальности сопровождения при использовании частично согласованного с моделью алгоритма обработки (кривая 1) по сравнению с алгоритмом, использующим только одиночные импульсы (кривая 2).

Рассмотрим по реализации на рис. 11б зависимость увеличения ОСП по квазиоптимальному алгоритму от диапазона возможных задержек по времени Δt (рис. 12). Видно, что ОСП заметно возрастает при увеличении интервала задержек эхо-сигналов и времени накопления мощности.

При достижении интервала задержек по времени 2 мс рост ОСП прекращается. Это говорит о том, что в данной экспериментальной реализации все пики, соответствующие эхо-сигналам от нескольких (трех) характеризующих АНПА локальных отражателей, расположены в пределах строка с интервалом времен ± 2 мс и уже “просуммированы”. На этой основе, учитывая, что отражатель перемещался под углом около 40–45 градусов к направлению, соединяющему источник эхо-сигналов и отражатель, легко получить оценку горизонтального размера отражателя – 3–4 м, что согласуется с известными исходными данными.

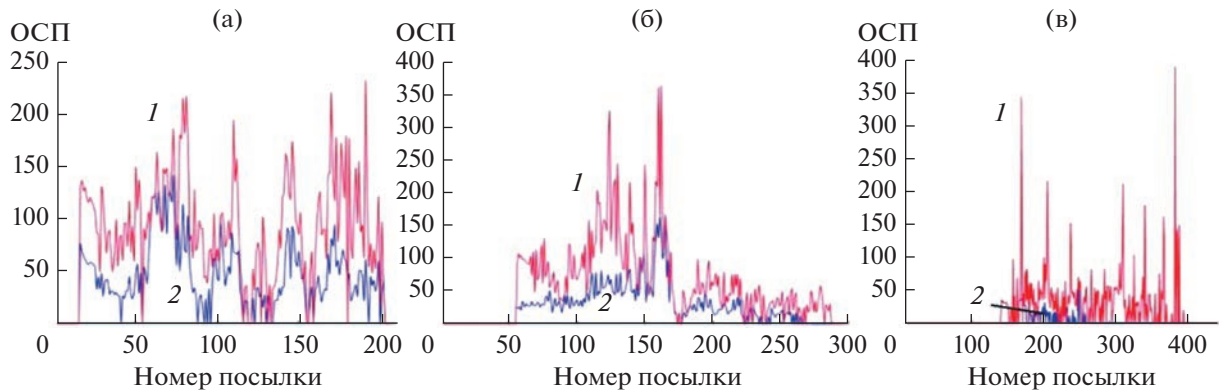


Рис. 11. (а), (б) – Зависимости ОСП на разных интервалах сопровождения отражателей двух типов – АНПА с разными временами накопления мощности, а также (в) – уголкового отражатель (кривая 2).

8. ОБНАРУЖЕНИЕ И СОПРОВОЖДЕНИЕ ЦЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАЕКТОРНОГО АНАЛИЗА

Из полученных экспериментальных данных следует, что при высокой информативности последовательности отметок обнаруживаемых целей формальная интерпретация получаемого изображения усложняется при наличии отражений от “местников” и ложных отметок целей. Как следует из литературы, для повышения эффективности обнаружения и идентификации целей необходимо выполнять их сопровождение и траекторную фильтрацию. Один из широко используемых алгоритмов траекторного анализа основан на применении калмановской фильтрации отметок целей [12–14]. Как следствие, общий тракт моделирования или обработки дополняется вторичной обработкой, на этапе которой прово-

дится траекторный анализ. Упрощенная блок-схема вторичной обработки представлена на рис. 13.

Не останавливаясь на аналитическом представлении способов моделирования алгоритма обнаружения с использованием формул (1)–(3) и детальном процессе калмановской фильтрации, который хорошо описан в [12–14], изложим основные этапы обработки:

- Из тракта первичной обработки или моделирования по формулам (1)–(3) принимаются и анализируются формуляры одиночных отметок (ФОО) сопровождаемых целей.
- Текущие значения параметров трасс экстраполируются на следующий шаг.
- Производится идентификация пришедших ФОО с каждой из целей, взятых на сопровождение. Каждая сопровождаемая цель отождествляется только с одной отметкой. Формируются формуляры неотожествленных отметок (ФНО).
- Идентифицируются ФОО и оставшиеся ФНО. Производится завязка новых трасс, оставшиеся ФОО переводятся в ФНО. Для всех сопровождаемых трасс производится повторная оценка вероятности обнаружения цели.
- В случае превышения заданного значения вероятности трасса и ее параметры выводятся на экран, и подается предупреждающий сигнал (зуммер и световой сигнал).

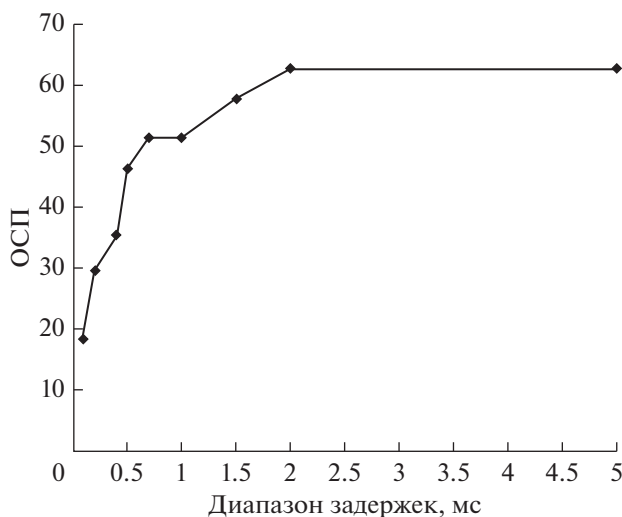


Рис. 12. Зависимость ОСП от величины диапазона задержек по времени.



Рис. 13. Блок-схема вторичной обработки информации, $Q_i(t_n)$ – формуляры обнаруженных целей, содержащие их текущие параметры – координаты и скорость движения цели.



Рис. 14. Результаты обнаружения и оценки координат от движущегося отражателя в натурном эксперименте, полученные на выходе алгоритмов (а) — обнаружения одиночных импульсов и (б) — с квазиоптимальным накоплением.

- Переход к началу нового цикла обзора пространства в выбранной зоне.

Пример реализации алгоритма обработки результатов натурного эксперимента с учетом траекторного анализа и предлагаемого метода накопления мощности сигналов приведен на рис. 14, на котором в полярной системе координат на экране индикатора ГЛС кругового обзора представлены две траектории движения отражателя. Слева приведена траектория при стандартном использовании одиночных обнаруженных отметок, а справа — траектория, полученная с использованием рекомендуемой квазиоптимальной обработки. Центр экрана обозначен точкой (слева вверх).

Из результатов, представленных на рис. 14, видно, что применение предлагаемого алгоритма позволяет более устойчиво обнаруживать отражатель. При этом отсутствуют зоны потери контакта, дальность сопровождения увеличивается. Сопровождение цели прекращается только после выхода за пределы зоны обзора ГЛС — в данном эксперименте за пределы 400 м, что для малогабаритных ГЛС является хорошим результатом.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный квазиоптимальный эвристический алгоритм, частично учитывающий свойства модели эхо-сигнала, повышает отношение сигнал/помеха на выходе системы обработки за счет учета мощности многолучевых эхо-сигналов, отраженных от обнаруживаемой многобликовой цели. Для реализации алгоритма на первом этапе устанавливается “заниженный начальный порог” обнаружения, с использованием которого обнаруживаются несколько дополнительных “пиков” — эхо-сигналов, отраженных от цели. Одновременно обнаруживаются множественные ложные тревоги. Объединение нескольких эхо-

сигналов на выбранном интервале расстояний (временном интервале) и их суммирование позволяет при сличении с “завышенным порогом” повысить вероятность правильного обнаружения и подавить ложные тревоги.

Для корректного выбора временного интервала, в пределах которого суммируются амплитуды эхо-лучей в соответствии с предлагаемым алгоритмом, нужно на основании имеющихся характеристик волновода выполнить расчеты интервалов задержек эхо-лучей для простого отражателя и расширить его на величину Δt_L , которая определяется вероятными размерами обнаруживаемых объектов и направлением их движения.

Авторы рекомендуют с целью повышения вероятности обнаружения применять разработанный достаточно простой алгоритм для частичного учета свойств среды и отражателя. Рекомендуется его использовать совместно с траекторным накоплением.

Авторы выражают особую признательность нашему товарищу по работе и другу д. ф.-м. н. В.В. Бородину — инициатору и руководителю данных разработок, внесшему основополагающий вклад в создание подобных систем, но не дожившему до их реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bangs W.J., Shultheiss P.M.* Space-time processing for optimal parameter estimation // *Signal Processing*. Eds. by Griffiths J., Stocklin P., Schooneveld C. London: Academic, 1973. P. 577–591.
2. *Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Schmidt H.* Matched field processing: Source localization in correlated noise as optimum parameter estimation problem // *J. Acoust. Soc. Am.* 1988. V. 83. № 2. P. 571–587.
3. *Малышкин Г.С.* Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. СПб.: ОАО “Концерн “ЦНИИ “Электроприбор””, 2011. Т. 1, 2.

4. *Клячкин В.И., Подгайский Ю.П.* Адаптивная обработка многолучевых сигналов в задачах обнаружения и оценивания: по данным отечественной и зарубежной печати за 1980–1990 гг. Обзор. Л.: ЦНИИ Румб, 1991. 48 с.
5. *Михнюк А.Н.* Идентификация и уточнение координат целей, обнаруживаемых мультистатистической системой подводного наблюдения // *Гидроакустика*. 2013. Вып. 18(2). С. 81–89.
6. *Кузнецов Г.Н., Михнюк А.Н., Полканов К.И.* Использование буксируемого векторно-скалярного модуля и согласованной фильтрации для однозначной оценки координат широкополосного источника в пассивном режиме // *Гидроакустика*. 2015. Вып. 24(4). С. 36–51.
7. *Машошин А.И.* Помехоустойчивость выделения максимумов в корреляционной функции широкополосного шумового сигнала морского объекта, обусловленных многолучевым распространением сигнала в водной среде // *Акуст. журн.* 2001. Т. 47. № 6. С. 823–829.
8. *Машошин А.И.* Исследование условий применимости корреляционной функции широкополосного многолучевого сигнала для оценки координат источника // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 3. С. 307–313.
9. *Тимошенков В.Г.* Оценка вероятности правильного обнаружения бликовой структуры портрета цели по эхосигналу для гидролокатора освещения ближней обстановки // *Гидроакустика*. 2017. Вып. 32(4). С. 51–55.
10. *Тимошенков В.Г.* Боковое поле функции неопределенности многобликового псевдошумового сигнала // *Гидроакустика*. 2018. Вып. 36(4). С. 50–55.
11. *Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Трофимов А.Т., Трусова О.И., Тихомиров М.М., Хилько А.А., Малеханов А.И., Коваленко В.В., Хилько А.И.* Высококачественное акустическое наблюдение неоднородностей в мелком море с неровным дном в присутствии сильной реверберации // *Акуст. журн.* 2001. Т. 57. № 5. С. 642–648.
12. *Гусев В.Г.* Системы пространственно-временной обработки гидроакустической информации. Л.: Судостроение, 1988. 283 с.
13. *Middleton D.* An Introduction to Statistical Communication Theory. New York: McGraw-Hill, 1960.
14. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.
15. *Драченко В.Н., Кузнецов Г.Н.* Исследование эффективности малогабаритных гидролокационных станций для обнаружения пловцов в шельфовой зоне // *Гидроакустика*. 2020. Вып. 43(3). С. 31–41.