

РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБСЛЕДОВАНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

**А.В. Инзарцев^{1,2}, А.М. Павин^{1,2},
О.А. Лебедко¹, М.А. Панин¹**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Дальневосточный федеральный университет²

Гидролокатор бокового обзора (ГБО) является эффективным средством для обнаружения донных объектов при выполнении мониторинга акваторий с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Автоматический мониторинг подразумевает выполнение поиска заданных объектов с помощью ГБО и их последующего обследования с использованием фотосистемы. В случае работы одного АНПА поиск и обследование выполняются последовательно. При использовании группировки роботов эти действия могут выполняться параллельно, что уменьшает время обследовательских работ.

Обнаружение на акустических изображениях заданных объектов в реальном времени осуществляется с помощью алгоритмов, которые включают: построение карты градиентов, выделение границ объектов и выделение самих объектов с использованием процедур кластеризации. Затем выбираются объекты, соответствующие заданным характеристикам, и определяются их координаты. Полученные координаты используются для организации выхода к обнаруженному объекту этого же или другого АНПА (в случае групповой работы) и проведения его фотопокрывтия.

Тестирование разработанных алгоритмов проводилось с использованием интегрированной информационно-управляющей и моделирующей системы АНПА. Исследуемые алгоритмы реализованы в виде программных модулей, пригодных для использования в АНПА. Обсуждаются результаты моделирования, подтвердившие возможность применения разработанных алгоритмов при выполнении реальных работ.

ВВЕДЕНИЕ

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) успешно применяются для выполнения мониторинга в акваториях и рельефах различных типов, при этом цели проведения работ могут быть различны [1]. Одной из актуальных и не вполне решенных задач мониторинга является автоматическое обнаружение и обследование малоразмерных (локальных) подводных объектов. Перспективным средством обнаружения таких объектов выступают сравнительно лёгкие и малопотребляющие гидролокаторы бокового обзора (ГБО), которые, в отличие от фото или электромагнитных средств [2], обладают широкой

полосой обзора и могут быть установлены на АНПА любого типа. Современные ГБО [3] (особенно высокочастотные, класса 500 кГц) при высокой разрешающей способности (до $0,5^\circ \times 0,03$ м) обладают полосой обзора до 2×120 м, что позволяет использовать их как для поиска донных объектов, так и для последующего формирования обследовательских траекторий АНПА. В контексте данной работы предполагается, что АНПА оснащён именно этим средством для предварительного обнаружения объектов.

Мониторинг акватории может проводиться как единичными АНПА, так и их группировкой [4–8]. Показательным примером групповых действий подводных

роботов является организация противоминной защиты акваторий, концепция которой разработана по программе департамента военных исследований – Office of Naval Research's (ONR) [7, 8]. Группировка включает патрульные АНПА, предназначенные для предварительного обнаружения миноподобных объектов на основе анализа получаемых гидролокационных изображений в реальном времени. Информация об обнаруженных «подозрительных» объектах по акустическим каналам связи передаётся другим членам группировки, которые оснащены со-

¹ 690091, Россия, Владивосток, ул. Суханова, 5а. E-mail: inzar@marine.febras.ru

² 690950, Россия, Владивосток, ул. Суханова, 8. E-mail: pavin@bk.ru

нарами высокого разрешения или фотосистемами для организации детального обследования обнаруженных объектов.

Примеры использования универсального АНПА для инспекции протяженных объектов и телеуправляемого подводного аппарата для автоматического обследования обнаруженных ранее точечных объектов можно найти в [2, 9]. Данная работа представляет собой продолжение указанных исследований и предлагает решение задачи автоматического обнаружения и обследования точечных объектов с помощью АНПА. Целью работы является разработка, реализация и тестирование алгоритмов распознавания и управления во время поиска малоразмерных объектов.

1. Предлагаемый сценарий выполнения мониторинга

Предлагаемый сценарий мониторинга акваторий с целью обнаружения и обследования малоразмерных подводных объектов единичным универсальным АНПА состоит из следующих основных фаз (рис. 1 – красная сплошная и пунктирная траектории):

1. Формирование обзорно-поисковой траектории и обнаружение

объектов по данным ГБО. В качестве основной поисковой траектории используется траектория типа «прямоугольный меандр» [10]. Такая траектория позволяет получить сплошное покрытие района обследования серией галсов с перекрытием ГБО-эхограмм и гарантирует отсутствие «белых пятен» в обследуемой акватории. Методика обнаружения (распознавания) донных объектов в реальном времени по получаемым эхограммам приводится в разд. 2.

2. После обнаружения объекта его вычисленные характеристики (координаты, размеры и ориентация) сравниваются с объектами из существующей базы данных. В случае, если объект отсутствует в базе данных, АНПА автоматически перепланирует миссию для выполнения дообследования найденного объекта. Перепланирование производится путём активизации агента [10], осуществляющего исследовательскую часть траектории (т.е. дообследование объекта). Дообследование производится с помощью сплошного фотопокрывания объекта и его окрестности с некоторым запасом, учитывающим накопленную погрешность системы счисления пути. Особенности ре-

ализации такого поведения АНПА приведены в разд. 3.

3. После окончания фотообследования АНПА возвращается к прерванной обзорной части миссии. Следует отметить, что точка возвращения находится на пройденном участке обзорной траектории, на некотором расстоянии от точки начала выполнения исследовательской части миссии (рис. 1). Это расстояние соответствует накопленной погрешности счисления пути [11] и необходимо для гарантированного ГБО-покрытия всей акватории. Кроме того, новый обнаруженный объект заносится в базу данных для предотвращения повторного обследования на текущем или последующем галсе обзорно-поисковой траектории.

Приведенный сценарий ориентирован на регулярный мониторинг известных акваторий с существующей базой данных на обнаруженные ранее объекты. Для первоначального поиска объектов в неизвестной акватории более рациональным видится применение группы АНПА. Использование нескольких аппаратов позволяет существенно сократить время полного обследования акватории за счет перераспределения функций в группе и параллельного фотообследования обнаруженных объектов. При этом один АНПА («ведущий») должен быть оснащен ГБО для поиска и обнаружения объектов на гидролокационных эхограммах. Этот аппарат должен иметь акустическую информационную связь с другими членами группировки для передачи им координат распознанных объектов и определения дистанции до каждого аппарата в группе. Другие аппараты («ведомые») должны быть оснащены фотосистемой для проведения дообследования обнаруженных ведущим аппаратом объектов.

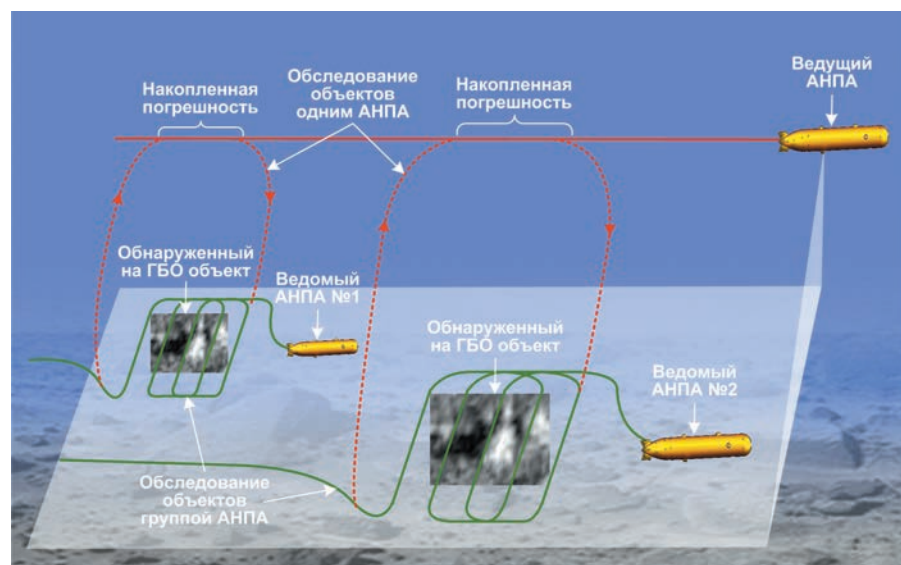


Рис. 1. Схема применения одного или нескольких АНПА для поиска и обследования малоразмерных объектов

Таким образом, при использовании группы аппаратов ведущий аппарат выполняет фазу 1 описанного выше сценария. В случае обнаружения объекта ведущий АНПА не прерывает свое движение, а передает координаты объекта ближайшему к цели свободному (не занятому обследованием) ведомому аппарату (рис. 1 – красная и зеленая непунктирные траектории). Ведомые аппараты следуют за ведущим на некотором удалении, чтобы не создавать помех ГБО-съемке. Распределение аппаратов за ведущим должно быть равномерным вдоль всей полосы покрытия ГБО для минимизации времени подхода к обнаруженному объекту. В случае получения команды на фотообследование ведомый аппарат выполняет фазу 2 сценария, т.е. прерывает миссию следования за ведущим и производит сплошное фотопокрывание окрестности объекта.

2. Использование гидролокационной информации для обнаружения донных объектов

Рассмотрим организацию автоматического обнаружения объектов, выполняемого ведущим (или одиночным) АНПА на основе обработки в реальном времени поступающей гидролокационной информации.

2.1. Предварительная обработка акустического изображения

В процессе движения подводного робота гидролокатор бокового обзора позволяет получать акустическую картину дна по левому и правому бортам АНПА. Принцип действия гидролокатора [3] основан на периодическом излучении зондирующих посылок с периодом повторения T (100–200 мс). Антен-

ны ГБО обладают веерообразной диаграммой направленности, до $40^\circ\sim 60^\circ$ в вертикальной плоскости и не более $1^\circ\sim 2^\circ$ в горизонтальной. После излучения очередного сигнала приемным трактом ГБО производится детектирование эхосигналов обратного рассеивания от удаленных участков дна и заполняется массив отражений (эхограмма ГБО).

Гидроакустический снимок (рис. 2, а) всегда содержит шумы, которые связаны с погрешностью измерения амплитуды акустической волны приемным трактом ГБО. Для подавления шумов используется пространственная взаимосвязь элементов акустического изображения (пикселей) и осуществляется предварительная фильтрация исходя из яркости соседних элементов (пикселей окружения). Тонкие и малоразмерные объекты имеют на изображении сравнительно небольшую площадь границ, поэтому фильтрация на основе большого количества соседних пикселей часто не рациональна не только по причине высокой ресурсоемкости, но и из-за того, что может «стереть» искомый объект, приняв его за шум. В работе применен фильтр, который не меняет значения точек на границе объектов, но избавляет изображение от локальных (однопиксельных) экстремумов. Суть алгоритма фильтрации заключается в изменении яркости пикселя на ближайшее значение из своего окружения

(в скользящем окне 3×3), если его яркость выше или ниже любого из пикселей окружения [11]. К достоинствам подобной фильтрации можно отнести достаточно низкую ресурсоемкость алгоритма (например, в сравнении с медианной фильтрацией, в которой необходимо применение сортировки). Кроме того, важным преимуществом является то, что фильтрация оставляет без изменений пиксели на границе даже очень тонких и малоразмерных объектов.

Распознавание объектов на эхограмме ГБО производится по их границам, которые, в свою очередь, определяются величиной и направлением градиента. Для вычисления градиента в каждой точке использовался оператор Шарра как обладающий наилучшей круговой симметрией. Проекция акустического изображения ГБО на поверхность дна обладает неравномерной решеткой, т.к. поперечное расстояние между точками меняется в зависимости от удаленности точек от АНПА, а продольное – зависит от скорости движения подводного робота. Поэтому значение градиента в каждой точке эхограммы ГБО корректировалось с учетом высоты и скорости движения АНПА. В целом метод предварительной обработки изображения аналогичен методу, используемому при распознавании протяженного объекта [11]. Результирующее изображение модулей градиентов представлено на рис. 2, б. После

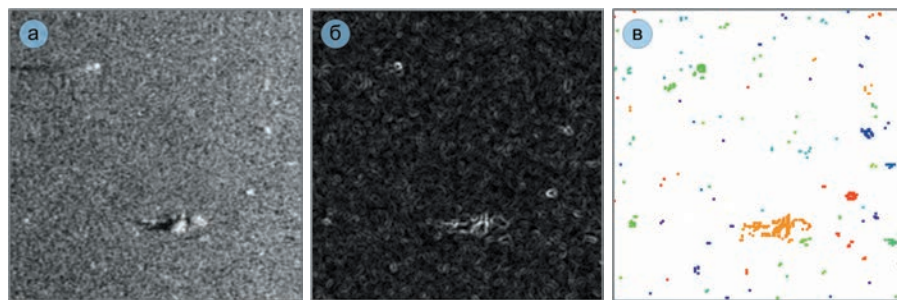


Рис. 2. Фрагмент изображения ГБО: а – исходная эхограмма; б – карта градиентов; в – границы объектов

получения карты градиентов не сложно отобразить определенный процент наиболее контрастных пикселей. Данные точки следует интерпретировать как точки-претенденты границ искоемых объектов. Отбор наиболее контрастных точек производится путем построения гистограммы распределения полутонов для карты градиентов [11]. Отобранные точки для фрагмента рис. 2, б представлены на рис. 2, в (на цвет точек не следует обращать внимания, т.к. информация о принадлежности тому или иному объекту появляется только на стадии обнаружения объектов).

2.2. Обнаружение объектов по данным ГБО

Для обнаружения заранее не известного количества малоразмерных объектов на акустическом снимке используются методы и алгоритмы анализа структуры многомерных данных. При этом возможно применение процедур объединения или разделения кластеров (пикселей границ объектов), относящихся к методам иерархического группирования. Использование процедур объединения основано на последовательном соединении кластеров в группы до тех пор, пока расстояние между группами не превысит заданное. Мету близости групп можно рассчитывать как «расстояние ближайшего соседа». Данное расстояние q между группами объектов $U=\{u_i\}$ и $V=\{v_j\}$ рассчитывается как дистанция между двумя ближайшими элементами этих групп:

$$q(U, V) = \min_{\substack{i=1 \dots N_U \\ j=1 \dots N_V}} r(u_i, v_j), \quad (1)$$

где N_U и N_V – количество объектов в группах U и V соответственно; $r(u_i, v_j)$ – метрика расстояния между объектами u_i и v_j .

В свою очередь, расстояние $r(u_i, v_j)$ на плоскости акустическо-

го изображения между элементами групп (пикселями объектов) рассчитывается как:

$$r(u_i, v_j) = \sqrt{(u_i^x - v_j^x)^2 + (u_i^y - v_j^y)^2}, \quad (2)$$

где u_i^x, u_i^y и v_j^x, v_j^y – X, Y координаты элементов из групп U и V соответственно.

Таким образом, для решения задачи объединения пикселей в группы (объекты) необходимо задать минимальную величину расстояния между объектами, которая определяется исходя из масштаба (разрешения) акустического изображения. Алгоритм выделения объектов состоит из следующих основных шагов:

- 1) на первом шаге все пиксели, принадлежащие границам объектов, считаются отдельными (не объединенными) кластерами;
- 2) далее выбирается первый по списку кластер (например, с помощью перебора по осям X и Y) и отмечается как объект с номером $n = 1$;
- 3) обследуются все необъединенные кластеры (не отмеченные номером), лежащие на расстоянии не более заданного от найденного. Расстояние между кластерами рассчитывается по формуле (2). Если таковые кластеры имеются, то они отмечаются номером n и для них повторяется шаг 3. Если таковых больше нет, то следует переход к шагу 4;
- 4) ищется следующий по списку необъединенный кластер и если такой находится, то для него

присваивается номер $n := n + 1$ и повторяется шаг 3. Если таковых больше нет, то распознавание считается завершенным, количество выделенных объектов на изображении составляет n и каждый пиксель изображения отмечен соответствующим номером объекта.

Пример выделения малоразмерных объектов на изображении ГБО представлен на рис. 2, в (разные объекты отмечены случайными цветами) и рис. 3, а (цвет точек соответствует длине границ объектов: синий – малая длина, красный – большая). Можно видеть, что близко лежащие точки окрашены одним цветом, т.е. принадлежат одному и тому же объекту (рис. 2, в).

После объединения множества пикселей изображения в отдельные объекты необходимо классифицировать каждый из полученных объектов. Для этого определяются характеристики (вектор признаков) каждого объекта. Сравнив данные характеристики с эталонными величинами из некоторой базы данных объектов, можно произвести классификацию обнаруженного объекта. К характеристикам, которые несложно определить исходя из геометрического расположения точек внутри объекта, следует отнести: длину границ объекта на изображении; габариты (длина и ширина) самого объекта; расположение объекта (его центра масс); направление объекта на карте дна и некоторые другие.

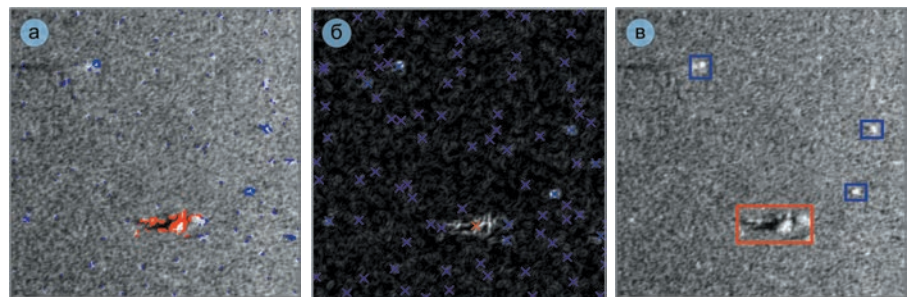


Рис. 3. Обнаруженные объекты: а – цвет точек соответствует длине границ объектов; б – распределение центров масс объектов на карте градиентов; в – размеры объектов на акустическом изображении

На рис. 3 приведены данные распределения границ объектов, центров масс, а также продольные и поперечные размеры выделенных объектов. Исходя из характеристик распознанных объектов и их геометрического расположения на поверхности дна можно принять решение о дополнительном обследовании того или иного объекта и спланировать траекторию АНПА. Однако необходимо учитывать, что зачастую на изображении ГБО хорошо выделяются не сами объекты, а акустическая тень от них (рис. 3, в – тень внутри красного прямоугольника), что может приводить к ошибочной классификации подобных объектов. Учет и устранение данных особенностей гидролокационного снимка – задача будущих исследований.

Расчет протяженности границ, габаритов найденного объекта и преимущественного направления объекта становится достаточно тривиальной геометрической задачей, если неравномерную проекцию изображения ГБО на плоскость дна представить в виде локально-равномерных решеток с разными масштабными коэффициентами по осям дальности и времени. Данное упрощение не вносит существенных погрешностей в измерения характеристик объекта при условии равномерности скорости движения АНПА и относительно ровного грунта. Для расчета географических координат объекта, которые необходимы для проведения дополнительного обследования, применяется следующая математическая формулировка:

$$\begin{bmatrix} x_{t,s} \\ y_{t,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t^* \\ y_t^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varphi_t^*) & \sin(\varphi_t^*) \\ -\sin(\varphi_t^*) & \cos(\varphi_t^*) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dx_{t,s} \\ dy^{**} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $[x_{t,s}, y_{t,s}]^T$ – географические (абсолютные) координаты пикселей изображения; $dx_{t,s}$ – поперечное смещение точек; $[x_t^*, y_t^*]^T$ – местоположение подводного робота по данным системы счисления пути; φ_t^* – курс аппарата; dy^{**} – продольное местоположение антенн ГБО на борту АНПА; t – номер зондирующей посылки; s – номер эхосигнала обратного рассеивания.

В свою очередь, поперечное смещение точек $dx_{t,s}$ (проекция на горизонтальную плоскость наклонной дальности l_s) рассчитывается исходя из предположения, что рельеф дна не имеет существенных перепадов высот:

$$dx_{t,s} = dx^{**} \pm \sqrt{(l_s)^2 - (h_t^* + h^{**})^2}, \quad (4)$$

где h_t^* – отстояние (высота над грунтом) подводного аппарата; h^{**} и dx^{**} – высота и боковое смещение антенн на борту носителя; знак в уравнении (4) выбирается исходя из того, для какой антенны ГБО (левой «-» или правой «+») рассчитывается значение поперечного смещения.

3. Организация обследования обнаруженных объектов

После выхода АНПА в район интересующего объекта необходимо произвести тщательное обследование самого объекта и прилега-

ющей к нему территории. Для этих целей может использоваться бортовая исследовательская аппаратура, имеющаяся в наличии: телевизионная система, электромагнитный искатель, донный профилограф, датчики температуры, солености и химического состава воды и др. Во время обследования района вокруг донного объекта необходимо покрыть сам объект и прилегающую территорию фотосъемкой с небольшим перекрытием кадров. Ввиду того, что предполагаемые к обследованию объекты имеют небольшие размеры и фотосъемка также ведется с небольшой высоты, движение АНПА целесообразно организовать на малой скорости с использованием подруливающих движителей. Для решения этой задачи АНПА движется «змейкой» вдоль преимущественного направления объекта (рис. 4, а). Если район обследования невелик (меньше нескольких длин аппарата), то совершать развороты при переходе на новый галс неоправданно как энергетически, так и с точки зрения потраченного времени. Поэтому движение АНПА планируется как набор продольных перемещений аппарата носом-кормой (рис. 4, а). Переход с галса на галс производится за счёт лаговых перемещений робота.

При наличии существенного для АНПА течения необходимо

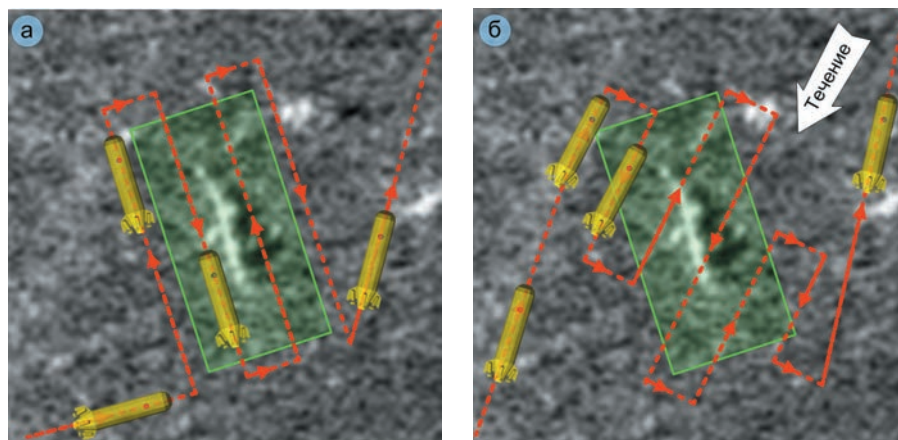


Рис. 4. Траектория обследования объектов: а – в отсутствие течения; б – при наличии существенного течения

ориентировать корпус аппарата носом против течения. Далее траектория планируется от края до края области обследования с некоторым запасом по ее краям (рис. 4, б). При этом в условиях течения необходимо стабилизировать скорость АНПА. Первоначальное определение параметров течения может быть оценено по величине и направлению дрейфа АНПА при его зависании.

Одновременно с проведением фотосъемки в районе местонахождения объекта можно производить электромагнитную гидролокацию и профилографирование дна, а также определение параметров физических полей (температуры, солености, радиации и химического состава воды). По этим данным можно локализовать объект поиска даже в случае отсутствия визуального контакта с ним (например, если таковой заилен или зарыт). Эти данные могут быть использованы для коррекции обследовательской траектории, например, в случае уточнения его местоположения.

4. Модельное решение задачи обнаружения и обследования донных объектов

Исследование процесса мониторинга донной поверхности проводилось с использованием интегрированной информационно-управляющей и моделирующей системы, применяемой в составе АНПА [12–15]. Особенностью системы является то, что исследуемые алгоритмы реализуются в виде программных модулей, пригодных для установки на борт реальных АНПА. На данном этапе исследований имитировался процесс мониторинга в случае применения одного универсального АНПА.

Применяемая модель генерации ГБО-изображений базируется

на методологии геометрической акустики, которой вполне достаточно для визуального представления данных и обработки сигнала алгоритмами распознавания образов (рис. 5, а). В работе сознательно опущены аспекты моделирования дифракции, интерференции и других явлений, связанных с волновой природой упругих колебаний, которые требуют больших вычислительных ресурсов и не вносят существенного вклада в результаты экспериментов. Создание снимков гидролокатора бокового обзора производится на основе изображений, получаемых средствами генерации трёхмерной сцены с использованием технологии OpenGL. Сцена строится путем формирования рельефа дна и размещения ряда объектов, таких как камни, затонувшие суда,

подводные лодки, искомые объекты и др. В месте нахождения подводного аппарата размещается источник света, параметры которого определяют яркость каждого пикселя на сцене. В этой же точке размещается камера, которая определяет диаграмму направленности антенны ГБО. Яркость пикселя представляет собой интенсивность отраженного сигнала, вычисляемую через косинус угла наклона между вектором нормали к точке поверхности и вектором направления на источник света, что позволяет имитировать работу ГБО с определенными параметрами и формировать изображения с разным угловым разрешением [13, 14].

На рис. 5, б приведена траектория АНПА во время поиска и обследования точечных объек-

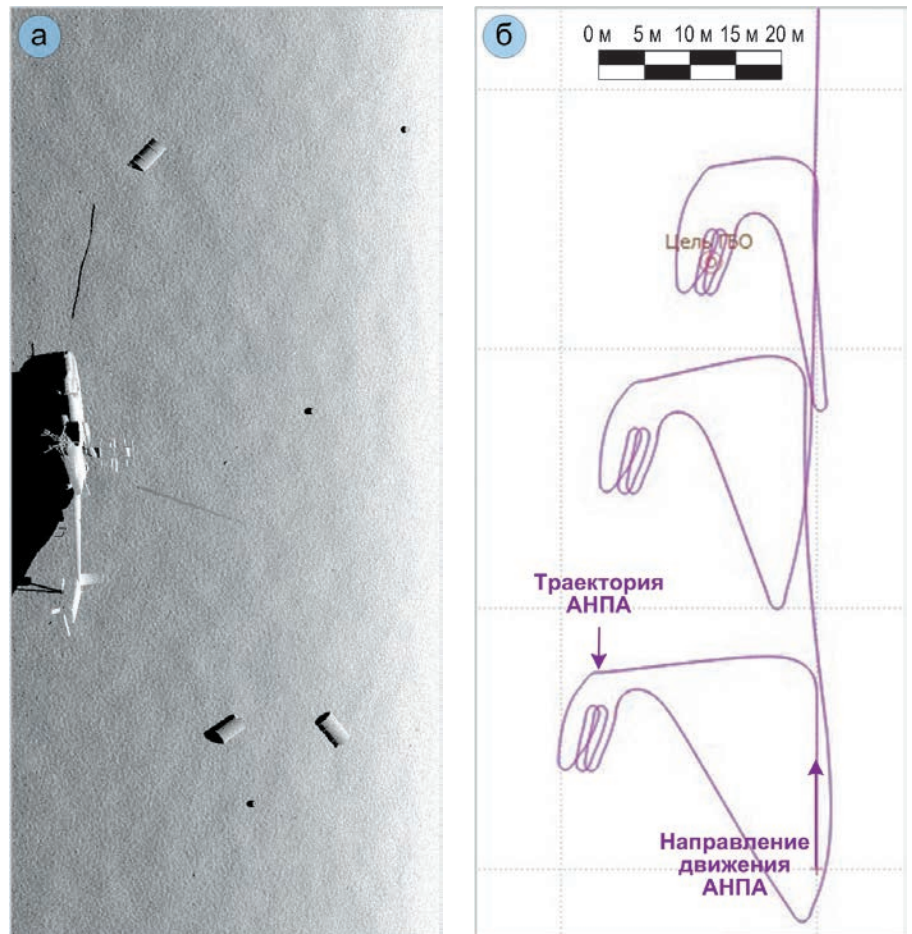


Рис. 5. Результаты модельных экспериментов по поиску и обследованию малоразмерных объектов: а – фрагмент изображения левой ветки ГБО; б – траектория АНПА

тов, полученная с учетом динамических свойств аппарата. Целью моделирования была комплексная проверка алгоритмического и программного обеспечения, предназначенного для установки на АНПА. На сцену было помещено три искомого объекта, один объект большого размера (затонувший вертолет) и множество других объектов, сопоставимых по своим характеристикам с искомым объектом (бочки и камни). В качестве искомого объекта было выбрано колесо диаметром 0,56 м и высотой 0,19 м. Параметры алгоритма идентификации были следующие: минимальный размер – 0,45 м, максимальный размер – 1 м, порог отбора наиболее контрастных точек – 1,7%, максимальное расстояние объединения пикселей в группы – 2 пикс.

В процессе моделирования сохранялись промежуточные данные системы распознавания для оценки результатов обработки изображения. Рисунок 6, а представляет комбинацию трех карт градиентов (на трех галсах), по которой можно судить о контрастности искомого объекта и посторонних элементов на карте. Можно видеть, что несмотря на присутствие на сцене множества контрастных посторонних объектов и достаточно зашумленное исходное ГБО-изображение система распознавания идентифицирует только искомый объект (рис. 6, б – красные окружности вокруг обнаруженных объектов). После обнаружения искомого объекта АНПА прерывает прямолинейную траекторию ГБО-обследования и переходит к детальному фотообследованию обнаруженного

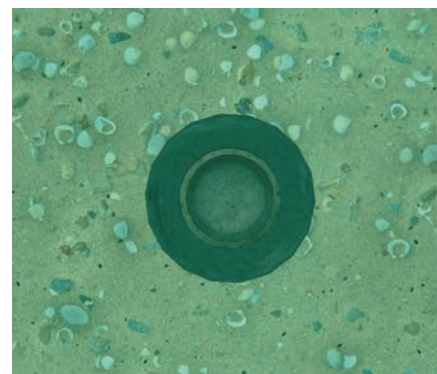


Рис. 7. Модельное фотоизображение обнаруженного объекта

объекта (см. рис. 5, б – три ответвляющиеся от генеральной направления траектории). На рис. 7 приведено модельное фотоизображение одного из найденных и отснятых аппаратом объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты обработки гидролокационных изображений, полученных АНПА во время модельного мониторинга акватории, позволяют сделать вывод о возможности применения алгоритмов распознавания в системе управления робота для обнаружения и обследования подводных объектов с заданными характеристиками. К достоинствам описанных методов можно отнести низкую ресурсоемкость применяемых алгоритмов, а также высокую вероятность обнаружения объектов при низкой вероятности ложных срабатываний. Дальнейшие исследования предполагается вести в следующих направлениях:

- проверка работоспособности описанного подхода для случая использования группы АНПА, а также проведение натурных экспериментов с существующими образцами подводной робототехники;
- модернизация алгоритма распознавания для обнаружения объектов, обладающих большей тенью, существенно превышающей размеры самого объекта;

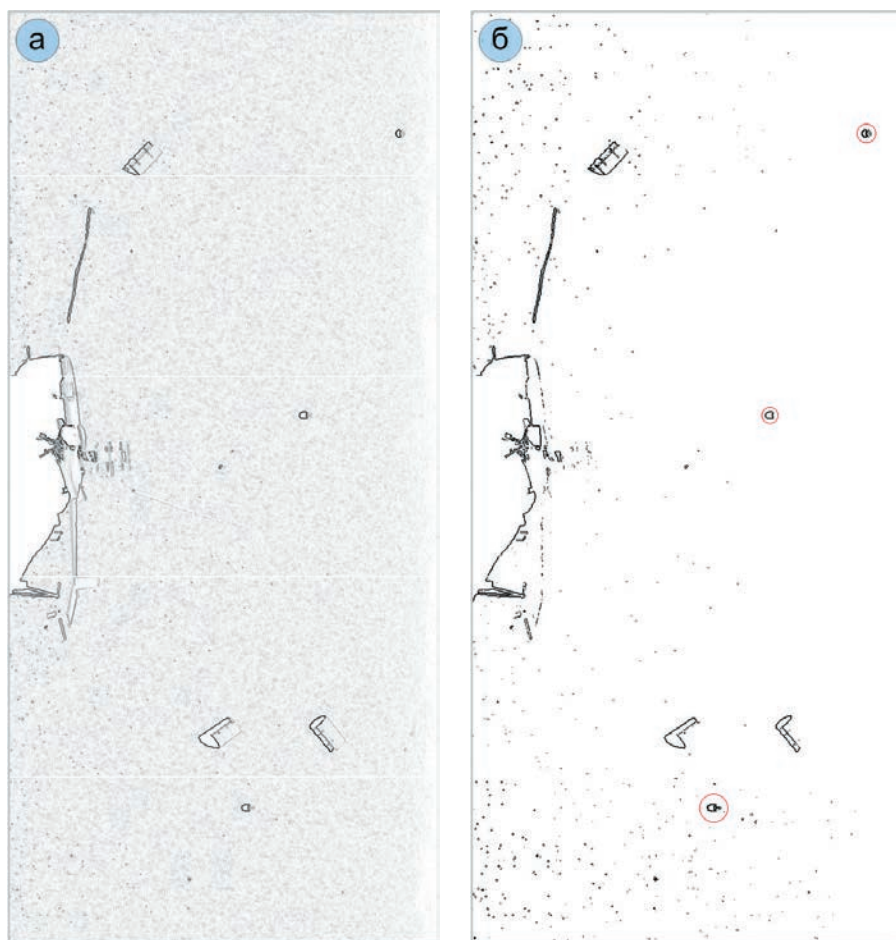


Рис. 6. Результаты обработки модельного изображения: а – карта градиентов; б – наиболее контрастные точки и обнаруженные объекты (отмечены красными окружностями)

- разработка принципов функционирования и создание бортовой базы данных обнаруженных объектов мониторинга.

Работа является частью проекта «Технологии мониторинга и рационального использования морских биологических

ресурсов» [4–6, 11–15] и выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-50-00034 (в части разработки алгоритмов автоматизированного планирования и коррекции обследовательских траекторий движения АНПА при выполнении мониторинга

и обзорно-поисковых операций) и гранта РФФИ № 16-07-00350 (в части разработки алгоритмов обнаружения донных объектов с заданными характеристиками на гидролокационных изображениях и организации модельных экспериментов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Рылов Н.И. Мониторинг морского дна с применением технологий интеллектуальной обработки данных поисковых устройств на борту АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2(20). С. 20–27.
2. Кукарских А.К., Павин А.М. Электромагнитный искатель для обнаружения и отслеживания металлосодержащих подводных протяженных объектов // Приборы. 2008. №4. С. 33–38.
3. Золотарев В.В., Золотарев А.В., Федотов Д.Б., Ходоренко М.С. Обзорно-поисковые гидролокаторы ИПМТ и их применение в составе подводных роботов // Тр. VIII Междунар. конф. «Современные методы и средства океанологических исследований». М., 2003. С. 254–256.
4. Tuphanov I., Scherbatyuk A. A centralized planner considering task spatial configuration for a group of marine vehicles: field test results // Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Hamburg, Germany, 2015.
5. Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Некоторые результаты морских испытаний централизованной системы управления группой морских роботов // Управление большими системами. М.: ИПУ РАН, 2016. № 59. С. 233–245.
6. Scherbatyuk A., Sporyshev M. Comparison of Some Algorithms for Centralized Planning of AUV Group Operation for Local Heterogeneities Survey // Proceedings of the OCEANS'16 Conf. Shanghai, China, 2016.
7. Charles M. Ciany, William C. Zurawski, Gerald J. Dobeck, Dennis R. Weilert Real-Time Performance of Fusion Algorithms for Computer Aided Detection and Classification of Bottom Mines in the Littoral Environment // Proc. of the OCEANS'03 Conf. San-Diego, USA, 2003. P. 1119–1125.
8. Roger P. Stokey, Lee E. Freitag, Matthew D. Grund. A Compact Control Language for AUV Acoustic Communication. // Proc. of OCEANS'05-Europe Conf. Brest, France, 2005. P. 1133–1137.
9. Ваулин Ю.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М. Навигационное и алгоритмическое обеспечение ТНПА для эффективного решения задач идентификации донных целей и инспекции морских объектов // Материалы Пятой Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, 2013.
10. Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В. Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // Подводные исследования и робототехника. 2013. №1(15). С. 4–16.
11. Pavin A.M. Underwater Object Recognition in Photo Images // Proceedings of the OCEANS'15 Conf. Washington, USA, 2015.
12. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior // Proc. of the OCEANS'15 Conf. Washington, USA, 2015.
13. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G., Lebedko O., Panin M. A Reconfigurable Web-based Simulation Environment for AUV // Proc. of the OCEANS'15 Conf. Washington, USA, 2015.
14. Мельман С.В., Бобков В.А., Инзарцев А.В., Павин А.М., Черкашин А.С. Программный моделирующий комплекс для автономных подводных аппаратов на базе многопроцессорной архитектуры // Подводные исследования и робототехника. 2015. №1(19). С. 23–32.
15. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G. Reconfigurable Distributed Software Platform for a Group of UUVs (Yet Another Robot Platform) // Proc. of the OCEANS'16 Conf. Monterey, USA, 2016.

