

20. *Shishkov S. V., Chernyy S.V., Muzau K.* Algoritm opredeleniya geometricheskikh izmeneniy na kadrah videoposledovatel'nosti dlya obnaruzheniya malogabaritnykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Algorithm for determining geometric changes on frames of a video sequence for the detection of small unmanned aerial vehicles]: Vol. 1, *Sb. XVII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti»* [The collection of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference "Actual problems of protection and safety "]. Saint Petersburg: RARAN, 2014, pp. 275-281.
21. *Shishkov S.V.* Malogabaritnyy robotizirovannyy kompleks dlya bor'by s malogabaritnymi bespilotnymi letatel'nymi apparatami [A small-sized robotic complex for combating small unmanned aerial vehicles]. Patent RF No. 149412. МПК F41H 11/02, F41H 13/00. Declared 25.02.2014. Publ. 27.12.2014. Bull. № 36.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.В. Абраменков.

Митрофанов Дмитрий Геннадьевич – Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации имени Маршала Советского Союза А.М. Василевского; e-mail: mdgvarvo@yandex.ru; г. Смоленск, ул. Котовского, 2; тел.: 89043653864; д.т.н.; профессор; старший научный сотрудник НИЦ.

Шшков Сергей Викторович – Филиал Военной академии материально-технического обеспечения (г. Пенза), e-mail: sergej.shishkov.75@mail.ru; 440005, г. Пенза-5; тел.: 89648669855; полковник; д.т.н.; доцент; начальник кафедры.

Mitrofanov Dmitry Gennadievich – Military Academy of the Armed Forces of the Russian Federation. A.M. Vasilevsky; e-mail: mdgvarvo@yandex.ru; 2, Kotovskogo street, Smolensk, Russia; phone: +79043653864; dr. of eng. sc.; professor; senior researcher of the Research Center.

Shishkov Sergey Viktorovich – Filial of the Military Academy of Material and Technical Support (Penza); e-mail: sergej.shishkov.75@mail.ru; Penza-5, 440005, Russia; phone: +79648669855; Colonel; dr of eng. sc.; associate professor; head of the department.

УДК 004.896+629.58+001.891.57

А.В. Инзарцев, А.М. Павин, Г.Д. Елисеев, М.А. Панин

ОБНАРУЖЕНИЕ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ДОННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ГРУППЫ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ*

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), оснащенные гидролокаторами бокового обзора (ГБО) и фотосистемами, могут применяться для автоматического обнаружения и обследования локальных донных объектов. ГБО позволяет эффективно распознавать донные объекты на значительном удалении, в то время как фотосистема используется для детального документирования состояния объектов в ближней зоне. При этом для выполнения мониторинга возможны сценарии использования как одного универсального АНПА, циклически выполняющего этапы обнаружения и фотосъемки, так и группы специализированных АНПА, выполняющих эти действия одновременно (параллельно). 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 АНПА к обнаруженному объекту и проведения его фотообследования. Рассматривается модельное решение задачи мониторинга, включающее исследование алгоритмов

* Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания на 2018 г. № 264-2018-0001, а также при поддержке РФФИ (проект № 16-07-00350) и РНФ (проект № 14-50-00034).

распознавания объектов и управления АНПА при одиночном и групповом использовании. Эксперименты проводились с использованием интегрированной управляющей и моделирующей системы АНПА, созданной в ИПМТ ДВО РАН. Это позволяет отлаживать, а затем применять разработанные программные модули непосредственно в среде систем управления действующих аппаратов. Обсуждаются результаты экспериментов, подтвердившие возможность применения разработанных алгоритмов при выполнении реальных работ.

Автономный необитаемый подводный аппарат; автоматический мониторинг акваторий; гидролокационные изображения; выделение и распознавание объектов на изображениях; планирование миссии; моделирующий комплекс.

A.V. Inzartsev, A.M. Pavin, G.D. Eliseenko, M.A. Panin

DETECTION AND EXPLORATION OF LOCAL BOTTOM OBJECTS WITH GROUP OF SPECIAL AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES

Autonomous underwater vehicles (AUV) with side-scan sonars (SSS) and photosystems, could be used for automated detection and exploration of local bottom objects. SSS permits effectively recognize bottom objects at significant distance, whereas photosystem is frequently using for detailed documentation of state of some objects at near area. Under these circumstances for solving a monitoring problem it is possible to use different scenarios of using both individual AUV, which performs cyclically stages sss-detection and photo documentation, and group of specialized AUVs which perform these actions simultaneously (in parallel mode). Detection at acoustic images of selected objects in real time is performing by algorithms which include building gradient map, detection of boundaries of objects and objects detection with clustering procedures. Then algorithms select objects which correspond to specified characteristics and detect their coordinates. Detected coordinates are used for displacement of AUV to detected object and photo coverage. The work deals with model solution of monitoring problem. It includes algorithm research of objects recognition and AUV control both for individual and group using. Experiments were made with integrated control and modeling AUV system created at IMTP FEB RAS. It allows debugging and using developed program modules directly in control systems environments of active AUVs. Experimental results confirming the usefulness of developed algorithms for real works are discussed.

Autonomous underwater vehicle; automated monitoring of water areas; side sonar scan images; sss-images; detection and recognition of objects at images; mission planning; modeling complex.

Введение. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) успешно применяются для выполнения мониторинга в акваториях различных типов, при этом цели проведения работ могут быть различны [1]. При проведении таких работ важнейшей задачей является повышение их эффективности, уменьшение затраченного времени и, соответственно, стоимости. Традиционная технология применения АНПА для мониторинга предполагает циклическое повторение запусков, включающих этапы обзорной съемки (акустической, фото, электромагнитной и др.), постобработки полученной информации с целью выявления объектов для отслеживания и планирования последующих обзорных запусков в районах с уточненными координатами. Перенос функций обработки информации обзорно-поисковых систем на борт АНПА и организация адекватной реакции на обнаруженные в реальном времени объекты позволяет получить желаемый результат за счёт радикального сокращения упомянутой выше технологической цепочки, поскольку миссия (задание для АНПА) может автоматически корректироваться при обнаружении искомых объектов [2].

Одной из актуальных и не вполне решенных задач мониторинга является автоматическое обнаружение и обследование малоразмерных (локальных) подводных объектов. Эффективным средством обнаружения таких объектов высту-

пают сравнительно лёгкие и доступные гидролокаторы бокового обзора (ГБО). ГБО обладают широкой полосой обзора и, в отличие от фото или электромагнитных средств [2], могут быть установлены на АНПА любого типа. Один из вариантов автоматического мониторинга подразумевает выполнение поиска заданных объектов с помощью ГБО и их последующего обследования с использованием фотосистемы.

Мониторинг акватории может проводиться как единичными АНПА, так и их группировкой [3–7]. 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) [6, 7]. 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 сонарами 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, 8]. Данная работа представляет собой продолжение указанных исследований и предлагает решение задачи автоматического обнаружения и обследования точечных объектов с помощью одного универсального АНПА или группировки как универсальных, так и специализированных роботов. Целью работы является разработка, реализация и тестирование алгоритмов распознавания и управления во время поиска малоразмерных объектов.

Сценарии выполнения мониторинга. Сценарий выполнения поисковых работ с помощью одного универсального АНПА, оснащенного ГБО и фотосистемой, предполагает циклическое повторение аппаратом следующих основных фаз мониторинга (рис. 1).

1. Формирование обзорно-поисковой траектории и обнаружение объектов по данным ГБО во время движения. В качестве основной поисковой траектории используется траектория типа «прямоугольный меандр» [9]. Такая траектория позволяет получить сплошное покрытие района обследования серией галсов с перекрытием ГБО-эхограмм и гарантирует отсутствие «белых пятен» в обследуемой акватории.

2. После обнаружения объекта его вычисленные характеристики (координаты, размеры и ориентация) сравниваются с заданными. Если параметры обнаруженного объекта соответствуют параметрам искомого, то АНПА автоматически перепланирует миссию для выполнения обследования найденного объекта. Перепланирование производится путём активизации агента тактического уровня [9], осуществляющего обследовательскую часть траектории. Обследование производится с помощью сплошного фотопокрытия объекта и его окрестности с некоторым запасом, учитывающим накопленную погрешность системы счисления пути.

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 обследовательской части миссии (рис. 1). Это расстояние соответствует накопленной погрешности счисления пути [10] и необходимо для гарантированного ГБО-покрытия всей акватории.

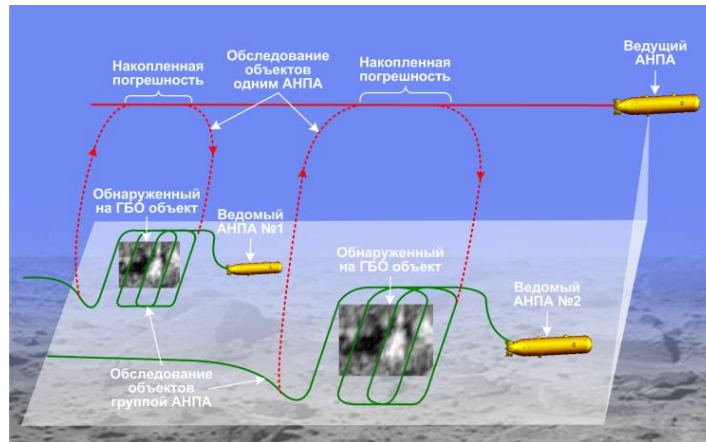


Рис. 1. Схема применения одного или нескольких АНПА для поиска и обследования малоразмерных объектов

Время выполнения таких работ может быть пропорционально уменьшено за счёт одновременного использования нескольких универсальных АНПА, независимо работающих по описанному сценарию в разных районах акватории. Как правило, универсальные АНПА являются относительно дорогими и тяжелыми аппаратами, поскольку должны обеспечить как эффективное движение с большими скоростями (что оптимально для ГБО-съемки), так и активное маневрирование вблизи грунта (что необходимо для фотографирования). Кроме того, такое использование АНПА связано с периодическим переходом аппарата от режима ГБО-обнаружения к режиму фотосъемки и обратно. Это обстоятельство значительно ухудшает условия использования ГБО, требующего для работы равномерного и, желательно, прямолинейного движения.

Альтернативным вариантом работы является использование для целей мониторинга групп, состоящих из специализированных роботов. Одни из них являются носителями ГБО и обеспечивают высокопроизводительное покрытие акватории и обнаружение объектов. Другие оборудованы фотосистемами и движительно-рулевыми комплексами, позволяющими движение и маневрирование на малых скоростях и высотах. При этом в составе рабочей группы может быть один робот-обнаружитель и несколько АНПА, обеспечивающих фотографирование.

АНПА, оснащенный ГБО для поиска и обнаружения объектов на гидролокационных эхограммах, является «ведущим». Ведущий аппарат обеспечивает формирование обзорно-поисковой траектории. 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, оснащенные фотосистемой для проведения обследования обнаруженных ведущим аппаратом объектов, являются «ведомыми». 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, с целью минимизации времени подхода к обнаруженному объекту. В случае обнаружения объекта, ведущий АНПА передает информацию об объекте ближайшему к цели свободному (не занятому обследованием) ведомому аппарату.

В свою очередь, после получения команды, ведомый аппарат прерывает миссию следования за ведущим, самостоятельно рассчитывает галсы для манёвра подхода к объекту и манёвров при фотографировании, и производит сплошное фотопокрывание окрестности объекта. После окончания фотообследования АНПА возвращается к режиму следования за ведущим (рис. 1).

Ведущий продолжает следование по намеченной траектории до тех пор, пока:

- ◆ существует хотя бы один ведомый, не занятый фотообследованием;
- ◆ расстояние до самого дальнего ведомого не превышает зоны действия связи.

В противном случае ведущий переходит в режим ожидания («зависания» или «ленивой восьмерки»).

Использование гидролокационной информации для обнаружения донных объектов. Гидроакустический снимок всегда содержит шумы, которые связаны с погрешностью измерения амплитуды акустической волны приемным трактом ГБОУ. 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 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 [10]. 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.

Обнаружение объектов в реальном времени на основе акустических данных включает следующие этапы [6, 10]:

- ◆ Предварительная фильтрация. Для подавления шумов используется пространственная взаимосвязь элементов акустического изображения (пикселей). Фильтр не меняет значения точек на границе объектов, но избавляет изображение от локальных (однопиксельных) экстремумов. К достоинствам подобной фильтрации можно отнести низкую ресурсоемкость алгоритма, а также то, что фильтрация оставляет без изменений пиксели на границах даже очень тонких и малоразмерных объектов.

- ◆ Построение карты градиентов и выделение границ объектов. Для вычисления градиента в каждой точке используется оператор Шарра как обладающий наилучшей круговой симметрией. Проекция акустического изображения на поверхность дна обладает неравномерной решеткой, поэтому значение градиента в каждой точке эхограммы корректируется с учетом высоты и скорости движения АНПА. Отбор наиболее контрастных точек (точек-претендентов на то, чтобы быть границами искомых объектов) производится путем построения гистограммы распределения полутонов для карты градиентов.

- ◆ Выделение объектов. Для обнаружения заранее неизвестного количества малоразмерных объектов на акустическом снимке используются методы и алгоритмы анализа структуры многомерных данных. При этом применяются процедуры объединения или разделения кластеров (пикселей границ объектов), относящихся к методам иерархического группирования. Для решения задачи объедине-

ния пикселей в группы (объекты) по необходимости задается минимальная величина расстояния между объектами, которая определяется исходя из масштаба (разрешения) акустического изображения.

♦ Выявление объектов интереса. Для классификации определяются характеристики (вектор признаков) каждого объекта. К характеристикам относятся: длина границ объекта на изображении; габариты (длина и ширина) самого объекта; расположение объекта (его центра масс); направление объекта на карте дна.

Организация обследования обнаруженных объектов. После выхода АНПА в район интересующего объекта необходимо произвести тщательное обследование самого объекта и прилегающей 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 ведётся с небольшой высоты, движение АНПА целесообразно организовать на малой скорости с использованием подруливающих движителей. Для решения этой задачи АНПА движется по траектории типа «цветок», предполагающей многократное прохождение над исследуемым объектом с разных направлений.

Одновременно с проведением фотосъемки в районе местонахождения объекта можно проводить 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, а также скорректировать исследовательскую траекторию.

Фотообследование может включать также исследование протяженных объектов. Такие объекты целесообразно документировать фотосистемой при помощи алгоритмов покрытия областей [20–22], что позволит обобщить понятия «точечного» и «протяженного» объекта и применять ситуативные к объекту траектории при фотообследовании. Объекты больших габаритов (например, затонувшие корабли) целесообразно фотодокументировать при помощи группы аппаратов. Алгоритмы для решения такого рода задач описаны в работах [17–19]. Для возвышающихся над грунтом объектов удобнее использовать 3D-покрытие [23–24].

Модельное решение задачи обнаружения и обследования донных объектов. Исследование процесса мониторинга донной поверхности проводилось с использованием интегрированной навигационно-управляющей и моделирующей системы, применяемой в составе АНПА [11–14]. Связующее программное обеспечение системы (middleware) обеспечивает эффективное взаимодействие компонентов, размещенных на различных вычислительных узлах (в том числе, на различных АНПА), объединенных разнородными каналами связи. Особенностью системы является то, что исследуемые алгоритмы реализуются в виде программных модулей, готовых для установки на борт реальных 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. 2). 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 существенный вклад 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 [12, 13].

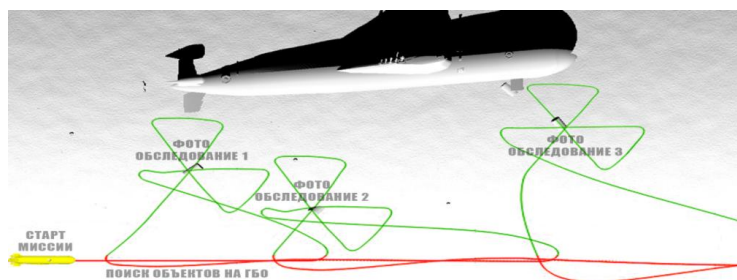


Рис. 2. Результат модельных экспериментов по поиску и обследованию объектов с использованием одного универсального АНПА

На рис. 2 приведена траектория движения единичного АНПА во время поиска и обследования точечных объектов, 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 искомых объекта, один объект большого размера (затонувшая подводная лодка) и множество других объектов, сопоставимых по своим характеристикам с искомыми объектами (бочки и камни). В качестве искомого объекта была выбрана бочка диаметром 0,6 м и высотой 0,9 м. Параметры алгоритма идентификации были следующие: минимальный размер – 0,8 м, максимальный размер – 1,75 м, порог отбора наиболее контрастных точек – 2,7 %, максимальное расстояние объединения пикселей в группы – 2 пикс. Обследование обнаруженных объектов осуществлялось с использованием упомянутой траектории типа «цветок».

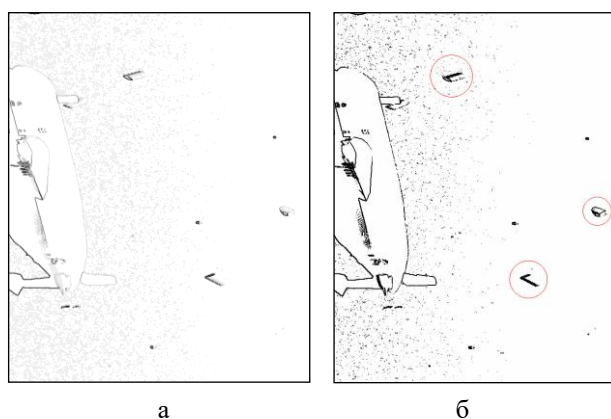


Рис. 3. Результаты обработки модельного изображения: а – карта градиентов; б – наиболее контрастные точки и обнаруженные объекты (отмечены окружностями)

В процессе моделирования сохранялись промежуточные данные системы распознавания для оценки результатов обработки изображения. На рис. 3,а представлена комбинация 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. 3,б – окружности вокруг обнаруженных объектов). После обнаружения искомого объекта АНПА прерывает прямолинейную траекторию ГБО-обследования и переходит к детальному фотообследованию обнаруженного объекта (рис. 2 – три ответвляющиеся от генерального направления траектории). На рис. 4 приведено модельное фото-изображение одного из найденных и отснятых аппаратом объекта.

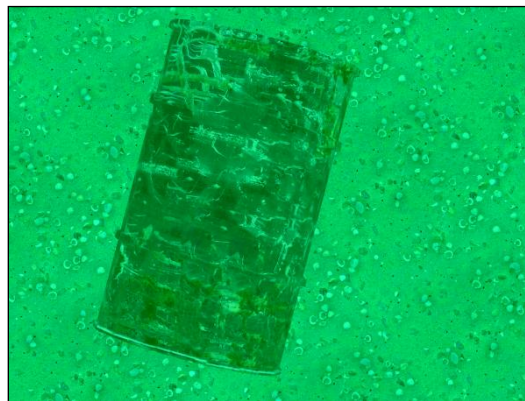


Рис. 4. Модельное фотоизображение обнаруженного объекта

Моделирование сценария групповой работы проводилось с использованием одного ведущего АНПА, оснащенного ГБО, и двух ведомых аппаратов, обеспечивающих фотообследование. Используемые алгоритмы обнаружения, обследования, а также сама модельная сцена повторяли условия моделирования поведения одиночного универсального АНПА.

Логика работы ведомого и ведущего аппаратов подробнее показана на рис. 5. В целом алгоритмы поведения обоих модулей аппаратов представимы в виде конечных автоматов.

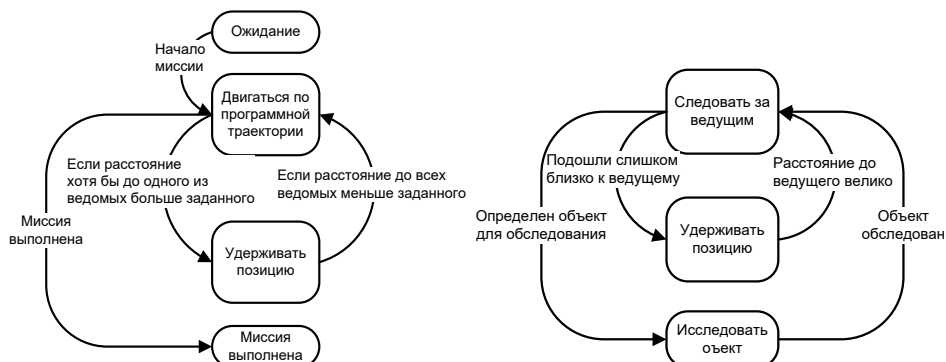


Рис. 5. Автомат состояний ведущего (вверху) и ведомого АНПА (внизу)

Поведение ведущего аппарата описывается двумя основными состояниями. Распознавание объектов и отсылка ведомым сообщений с координатами объекта для исследования производится в состоянии «Двигаться по программной траектории». После получения сообщения ведомый переключается в состояние «Исследовать объект» и самостоятельно рассчитывает галсы для манёвра подхода к объекту и фотографирования. Автомат состояний ведомого построен без учёта каких-либо сведений о начале или конце миссии. Данное решение продиктовано соображениями потенциальной сменяемости как ведущих, так и ведомых аппаратов в процессе выполнения миссии.

На рис. 6 приведена результирующая траектория, полученная группой аппаратов. Обследование производилось по обоим бортам от движущегося «ведущего» АНПА. При одновременном выполнении обследования обоими «ведомыми», «ведущий» был вынужден переходить в состояние ожидания, поскольку при продолжении движения связь с «ведомыми» могла быть утеряна из-за возросшего расстояния между ними.

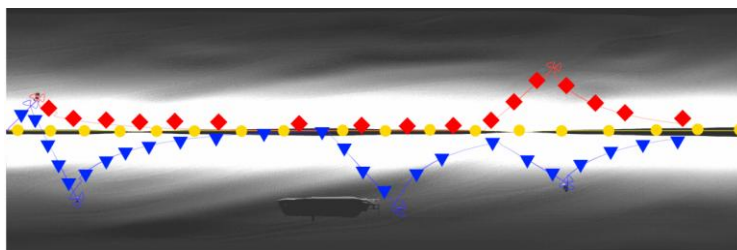


Рис. 6. Фрагмент обследования акватории с помощью группы специализированных АНПА. Нанесены траектории движения «ведущего» (помеченная кружками линия посередине) и двух «ведомых» (траектории, помеченные треугольниками и квадратами). В качестве подложки используются ГБО-изображения по обоим бортам «ведущего». Целевыми являются небольшие донные объекты, параметры которых описаны выше

В целом работа такой группировки показала более чем двукратное увеличение производительности за счёт отсутствия переходов аппаратов от режима обнаружения к режиму обследования и обратно. Кроме того, прямолинейное движение «ведущего» обеспечивает меньшее количество неверных обнаружений объектов за счёт лучших условий наблюдения.

Заключение. Полученные результаты моделирования подтверждают возможность применения разработанных алгоритмов обнаружения и управления в системе управления роботом для выполнения реальных работ. К достоинствам описанных методов можно отнести низкую ресурсоемкость применяемых алгоритмов, а также высокую вероятность обнаружения объектов при низкой вероятности ложных срабатываний. В дальнейшем предполагается исследование поведения группировки АНПА, состоящей из нескольких «ведущих» и «ведомых», и выполняющих одну общую миссию. Кроме того, должен быть разработан механизм идентификации объектов для избегания их повторного обследования разными АНПА.

Работа является частью проекта «Технологии мониторинга и рационального использования морских биологических ресурсов» [3–5, 10–16] и выполнена при поддержке гранта РФФИ № 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).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. *Кухарских А.К., Павин А.М.* Электромагнитный искатель для обнаружения и отслеживания металлосодержащих подводных протяженных объектов // Приборы. – 2008. – № 4. – С. 33-38.
3. *Tuphanov I., Scherbatyuk A.* A centralized planner considering task spatial configuration for a group of marine vehicles: field test results // International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hamburg, Germany: IEEE/RSJ. September-October, 2015.
4. *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.
5. *Scherbatyuk A., Sporyshev M.* Comparison of Some Algorithms for Centralized Planning of AUV Group Operation for Local Heterogeneities Survey // Proceedings of the OCEANS'16 Conference. Shanghai, China: MTS/IEEE, 2016.
6. *Charles M.C., Zurawski C.W., Dobeck G.J., Weilert D.R.* Real-Time Performance of Fusion Algorithms for Computer Aided Detection and Classification of Bottom Mines in the Littoral Environment // Proceedings of the OCEANS'03 Conference. San-Diego, USA: MTS/IEEE, 2003. – P. 1119-1125.
7. *Stokey P.R., Freitag L.E., Grund M.D.* A Compact Control Language for AUV Acoustic Communication // Proceedings of OCEANS'05-Europe Conference. Brest, France: MTS/IEEE, June 2005. – P. 1133-1137.
8. *Ваулин Ю.В., Костенко В.В., Павин А.М.* Особенности навигационного и алгоритмического обеспечения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2013. – № 2 (16). – С. 4-15.
9. *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.
10. *Pavin A.M.* Underwater Object Recognition in Photo Images // Proceedings of the OCEANS'15 Conference. Washington, USA: MTS/IEEE, October 2015.
11. *Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A.* Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior // Proceedings of the OCEANS'15 Conference. Washington, USA: MTS/IEEE, October 2015.
12. *Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G., Lebedko O., Panin M.* A Reconfigurable Web-based Simulation Environment for AUV // Proceedings of the OCEANS'15 Conference. Washington, USA: MTS/IEEE, October 2015.
13. *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). – P. 23-32.
14. *Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G.* Reconfigurable Distributed Software Platform for a Group of UUVs (Yet Another Robot Platform) // Proceedings of the OCEANS'16 Conference. Monterey, USA: MTS/IEEE, September 2016.
15. *Bobkov V., Mashentsev V., Tolstonogov A., Scherbatyuk A.* Adaptive Method for AUV Navigation Using Stereo Vision // Proceedings of the 26th ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 26-July 2, 2016.
16. *Inzartsev A., Pavin A., Kleschev A., Gribova V., Eliseenko G.* Application of Artificial Intelligence Techniques for Fault Diagnostics of Autonomous Underwater Vehicles // Proceedings of the OCEANS 2016 MTS/IEEE, Monterey, California, USA, September 19-23, 2016.
17. *Rekleitis I., New A.P., Rankin E.S., Choset H.* Efficient Boustrophedon Multi-Robot Coverage: an algorithmic approach // Ann Math Artif Intell. – 2008. – 52: 109. – <https://doi.org/10.1007/s10472-009-9120-2>.
18. *Hazon N.* Robust and Efficient Multi-Robot Coverage // Gal A. Kaminka's Publications. – <http://u.cs.biu.ac.il/~galk/Publications/Papers/noam-msc.pdf>, – 2005.
19. *Jung Y.-S., Lee K.-W., Lee B.-H.* Recent Advances in Multi Robot Systems // I-Tech Education and Publishing. – https://www.intechopen.com/books/recent_advances_in_multi_robot_systems/advances_in_sea_coverage_methods_using_autonomous_underwater_vehicles__auvs_, – 2008. – P. 69-100.

20. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Планирование и реализация траекторий движения автономного подводного робота при выполнении мониторинга в акваториях различных типов // Подводные исследования и робототехника, – 2016, – № 2 (22). – С. 25-35.
21. Galceran E., Carreras M. A survey on coverage path planning for robotics // Elsevier B.V. – <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.004> – December 2013. – Vol. 61, Issue 12. – P. 1258-1276.
22. Choset H. Coverage for robotics – A survey of recent results // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. – October 2001. – Vol. 31. – P. 113-126. – <https://doi.org/10.1023/A:1016639210559>.
23. Atkar P.N., Conner D.C., Greenfield A., Choset H., Rizzi A.A. Hierarchical Segmentation of Piecewise Pseudoextruded Surfaces for Uniform Coverage // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – March 2008. – Vol. 6. – P. 107-120.
24. Acar E. U., Choset H., A. Rizzi A., Atkar P. N., Hull D.. Morse Decompositions for Coverage Tasks // I. J. Robotics Res. – 2002. – Vol. 21. – P. 331-344.

REFERENCES

1. Inzartsev A.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Rylov N.I. Monitoring morskogo dna s primeneniem tekhnologiy intellektual'noy obrabotki dannykh poiskovykh ustroystv na bortu ANPA [Monitoring of the seabed with the use of intelligent data processing technologies of search devices on Board the ANPA], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2015, No. 2 (20), pp. 20-27.
2. Kukharskikh A.K., Pavin A.M. Elektromagnitnyy iskatel' dlya obnaruzheniya i otslezhivaniya metallosoderzhashchikh podvodnykh protyazhennykh ob"ektov [Electromagnetic finder for detection and tracking of metal-containing underwater extended objects], *Pribory* [Pribory], 2008, No. 4, pp. 33-38.
3. Tuphanov I., Scherbatyuk A. A centralized planner considering task spatial configuration for a group of marine vehicles: field test results, *International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hamburg, Germany: IEEE/RSJ. September-October, 2015*.
4. Tufanov I.E., Shcherbatyuk A.F. Nekotorye rezul'taty morskikh ispytaniy tsentralizovannoy sistemy upravleniya gruppy morskikh robotov [Some results of marine tests of the centralized control system of a group of marine robots], *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Control of large systems]. Moscow: IPU RAN, 2016, No. 59, pp. 233-245.
5. Scherbatyuk A., Sporyshev M. Comparison of Some Algorithms for Centralized Planning of AUV Group Operation for Local Heterogeneities Survey, *Proceedings of the OCEANS'16 Conference. Shanghai, China: MTS/IEEE, 2016*.
6. Charles M.C., Zurawski C.W., Dobeck G.J., Weilert D.R. Real-Time Performance of Fusion Algorithms for Computer Aided Detection and Classification of Bottom Mines in the Littoral Environment, *Proceedings of the OCEANS'03 Conference. San-Diego, USA: MTS/IEEE, 2003*, pp. 1119-1125.
7. Stokey P.R., Freitag L.E., Grund M.D. A Compact Control Language for AUV Acoustic Communication, *Proceedings of OCEANS'05-Europe Conference. Brest, France: MTS/IEEE, June 2005*, pp. 1133-1137.
8. Vaulin Yu.V., Kostenko V.V., Pavin A.M. Osobennosti navigatsionnogo i algoritmicheskogo obespecheniya teleupravlyаемого neobitaемого podvodnogo apparata [Features of navigation and algorithmic support of remote-controlled unmanned underwater vehicle], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2013, No. 2 (16), pp. 4-15.
9. Inzartsev A.V., Pavin A.M., Bagnitskiy A.V. Planirovanie i osushchestvlenie deystviy obsledovatel'skogo podvodnogo robota na baze povedencheskikh metodov [Planning and implementation of the survey underwater robot based on behavioral methods], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2013, No. 1 (15), pp. 4-16.
10. Pavin A.M. Underwater Object Recognition in Photo Images, *Proceedings of the OCEANS'15 Conference. Washington, USA: MTS/IEEE, October 2015*.
11. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A.. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior, *Proceedings of the OCEANS'15 Conference. Washington, USA: MTS/IEEE, October 2015*.
12. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G., Lebedko O., Panin M.. A Reconfigurable Web-based Simulation Environment for AUV, *Proceedings of the OCEANS'15 Conference. Washington, USA: MTS/IEEE, October 2015*.

13. Mel'man S.V., Bobkov V.A., Inzartsev A.V., Pavin A.M., Cherkashin A.S. Programmy modeliruyushchiy kompleks dlya avtonomnykh podvodnykh apparatov na baze mnogoprotsessornoy arkhitektury [A software simulation system for Autonomous underwater vehicles on the basis of the multi-processor architecture], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater researches and robotics], 2015, No. 1 (19), pp. 23-32.
14. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G. Reconfigurable Distributed Software Platform for a Group of UUVs (Yet Another Robot Platform), *Proceedings of the OCEANS'16 Conference. Monterey, USA: MTS/IEEE, September 2016*.
15. Bobkov V., Mashentsev V., Tolstonogov A., Scherbatyuk A. Adaptive Method for AUV Navigation Using Stereo Vision, *Proceedings of the 26th ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 26-July 2, 2016*.
16. Inzartsev A., Pavin A., Kleshev A., Gribova V., Eliseenko G. Application of Artificial Intelligence Techniques for Fault Diagnostics of Autonomous Underwater Vehicles, *Proceedings of the OCEANS 2016 MTS/IEEE, Monterey, California, USA, September 19-23, 2016*.
17. Rekleitis I., New A.P., Rankin E.S., Choset H. Efficient Boustrophedon Multi-Robot Coverage: an algorithmic approach, *Ann Math Artif Intell*, 2008. 52: 109. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10472-009-9120-2>.
18. Hazon N. Robust and Efficient Multi-Robot Coverage, *Gal A. Kaminka's Publications*. Available at: <http://u.cs.biu.ac.il/~galk/Publications/Papers/noam-msc.pdf>. 2005.
19. Jung Y.-S., Lee K.-W., Lee B.-H. Recent Advances in Multi Robot Systems, *I-Tech Education and Publishing*, 2008, pp. 69-100. Available at: https://www.intechopen.com/books/recent_advances_in_multi_robot_systems/advances_in_sea_coverage_methods_using_autonomous_underwater_vehicles__auvs_.
20. Galceran E., Carreras M. A survey on coverage path planning for robotics, *Elsevier B.V.* – December 2013, Vol. 61, Issue 12, pp. 1258-1276. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.004>.
21. Choset H. Coverage for robotics – A survey of recent results, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, October 2001, Vol. 31, pp. 113-126. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1016639210559>.
22. Atkar P.N., Conner D.C., Greenfield A., Choset H., Rizzi A.A. Hierarchical Segmentation of Piecewise Pseudoextruded Surfaces for Uniform Coverage, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, March 2008, Vol. 6, pp. 107-120.
23. Acar E. U., Choset H., A. Rizzi A., Atkar P. N., Hull D.. Morse Decompositions for Coverage Tasks, *I. J. Robotics Res.*, 2002, Vol. 21, pp. 331-344.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.К. Алексеев.

Инзарцев Александр Вячеславович – Федеральное государственное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИПМТ ДВО РАН); e-mail: inzar@marine.febras.ru; Приморский край, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А; д.т.н.; г.н.с.; научный сотрудник ДВФУ.

Павин Александр Михайлович – к.т.н.; зав. лабораторией; научный сотрудник ДВФУ.

Елисеенко Григорий Дмитриевич – младший научный сотрудник.

Панин Михаил Андреевич – стажёр-исследователь.

Inzartsev Alexander Vyacheslavovich – Federal State Budgetary Establishment Of Science Institute of Marine Technologies Problems Far Eastern Branch Russian Academy Of Sciences (IMTP FEB RAS); e-mail: inzar@marine.febras.ru; Primorskiy Kray, Vladivostok, Sukhanova street, 5A; dr. of eng. sc.; chief researcher; researcher of Far Eastern Federal University.

Pavin Alexander Mikhailovich – cand. of eng. sc.; head of the laboratory; researcher of Far Eastern Federal University.

Eliseenko Grigory Dmitrievich – junior researcher.

Panin Mikhail Andreevich – probationer researcher.