

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГРУПП МОРСКИХ РОБОТОВ ДЛЯ ОХРАНЫ ВОДНЫХ АКВАТОРИЙ: КРАТКИЙ ОБЗОР

М.С. Спорышев^{1,2}, А.Ф. Щербатюк^{1,2}

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

Морское наблюдение требуется для обнаружения, локализации и классификации посторонних объектов в указанном подводном пространстве с помощью стационарных или мобильных разнородных датчиков. Посторонние объекты могут быть подвижными или стационарными. Разные задачи возникают при решении задач охраны портов, критически важных объектов морской инфраструктуры или судов. Развитие морской робототехники привело к созданию комплексов разнородных автономных необитаемых подводных и водных (перемещающихся по поверхности моря) аппаратов, которые обеспечивают непрерывное присутствие и решение поставленных задач более надежно и существенно экономичнее. Рассмотрены связанные с охраной водных акваторий задачи и методы их решения с использованием групп морских роботов. Описаны некоторые предназначенные для этого морские робототехнические комплексы, а также приведены примеры выполнения операций по охране водных акваторий в реальных морских условиях.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы морские робототехнические комплексы (МРК) все более широко применяются для решения задач охраны водных акваторий [1]. Это связано с их возрастающей эффективностью и значительно меньшей стоимостью по сравнению с обитаемыми комплексами и судами. В большинстве случаев МРК представляет собой группировку автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащенных системами навигации, связи и сенсорными устройствами, обеспечивающими на заданных расстояниях обнаружение посторонних объектов. Продолжительность работы таких МРК может составлять от десятков часов до нескольких суток [2, 3]. Современные МРК способны решать в реальном времени задачи распознавания сигналов, а также оснащены системами связи для оперативной передачи текущей информации в центр управления [4].

Охрана водных акваторий связана с обнаружением посторонних объектов, которые могут быть как неподвижными (затонувшие объекты, брошенные с судов предметы или взрывоопасные устройства), так и мобильными (морские обитатели, подводные аппараты, пловцы или подводные лодки). Традиционные системы наблюдения включают стационарные наборы сенсоров или дорогие и требующие продолжительного времени для развертывания комплексы, основанные на использовании судов. Применение для решения данной задачи систем, созданных на основе мобильных роботизированных комплексов, позволяет формировать распределенные в пространстве сети интеллектуальных сенсоров, способные более эффективно и с существенно меньшими затратами решать поставленную задачу.

При решении поставленной задачи оптические и электромагнитные датчики имеют вспомо-

гательное значение, так как свет проникает внутрь океана на небольшую глубину, а электромагнитные волны под водой распространяются лишь на короткие расстояния из-за высокого затухания. Основным прибором для обнаружения подводных объектов является гидролокатор, принцип действия которого основан на измерении уровня гидроакустического сигнала. Различают пассивные гидролокационные системы, которые измеряют собственные шумы объектов, и активные, которые используют отдельный излучатель и измеряют отраженный от объектов сигнал.

Проблема охраны водной акватории включает несколько задач. Исходной задачей является организация патрулирования указанной области таким образом,

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: 8 (423) 2226416. E-mail: alex-scherba@yandex.ru

² 690091, Владивосток, ул. Суханова, 8. Тел.: 8 (423) 2215545. E-mail: coockoombra@gmail.com

чтобы с требуемой вероятностью за отведенное время обнаружить посторонние объекты. В случае обнаружения посторонних объектов возникает задача их локализации и распознавания, а также оперативной передачи полученной информации в центр управления. Наконец, в случае принятия решения о том, что данный объект является нарушителем, необходимо организовать его перехват.

Данная статья организована следующим образом. Раздел 1 посвящен описанию алгоритмов групповой работы МРК при решении задачи охраны заданных акваторий или объектов. В разделе 2 рассмотрены МРК, предназначенные для выполнения групповых операций, а также системы навигации и связи, обеспечивающие их коллективную работу. Примеры решения задач охраны водных акваторий в реальных морских условиях приведены в разделе 3.

1. Алгоритмы организации охраны водных акваторий с использованием МРК

Одной из задач, связанных с охраной акваторий, является задача патрулирования, которая заключается в организации периодического обхода некоторого массива путевых точек. Целью решения задачи патрулирования может быть обнаружение вторжения нарушителя, а также организация его перехвата. В общем случае для решения данной задачи используются алгоритмы планирования, решающие задачи коммивояжера.

В работе [5] описывается использование группы роботов для патрулирования периметра. При этом нарушитель может владеть полной информацией о перемещении роботов. Если роботов недостаточно, чтобы покрыть периметр полностью, нарушитель может выбрать оптимальный момент для вторжения. В данной работе пред-

лагается недетерминированный алгоритм патрулирования. Периметр разбит на конечное число клеток. Каждый патрулирующий за единицу времени может перейти в одну из соседних клеток либо остаться в текущей. Поведение патрулирующего в этом случае описывается марковской цепью с конечным числом состояний. Предполагается, что вероятность перехода у всех патрулирующих одинакова. При этом рассматриваются три возможные марковские модели:

1. *Двунаправленная*. С вероятностью p патрулирующий в следующий момент времени оказывается в клетке справа, с вероятностью $1-p$ – в клетке слева от текущей.

2. *Однонаправленная, с нулевой стоимостью разворота*. С вероятностью p патрулирующий сохраняет текущее направление и оказывается в следующей клетке вдоль данного направления. С вероятностью q он меняет направление и оказывается в следующей клетке вдоль нового направления.

3. *Однонаправленная с ненулевой стоимостью разворота*. С вероятностью p патрулирующий сохраняет текущее направление и оказывается в следующей клетке вдоль данного направления. С вероятностью q он меняет направление, но остается в текущей клетке.

Одним из исходных параметров задачи является время t , которое нарушителю необходимо провести в одной клетке, чтобы прорваться через периметр. Авторы далее описывают алгоритм нахождения оптимальной вероятности p , которая максимизирует вероятность обнаружения нарушителя при заданном времени t и конфигурации периметра. В работе также доказывается теорема о том, что для максимизации вероятности обнаружения необходимо, чтобы все патрулирующие синхронно выполняли переход в одну и ту же сторону.

Еще один пример использования вероятностной модели описан в работе [6]. Она посвящена задаче борьбы с браконьерством. В рассмотренном сценарии существует автономная система наблюдения, которая с помощью мобильных роботов (в работе используются беспилотные летательные аппараты) или установленных камер наблюдения может отправить сигнал об обнаружении нарушителя в определенной местности. Однако такая система, как правило, лишь подает сигнал, когда замечает подозрительную активность, но точную координату, в которой окажется нарушитель, определить не может. В этом случае следует считать, что при срабатывании сигнала система патрулирования знает только некоторые ограничения области, в которой мог оказаться нарушитель.

Борьба с нарушителем в такой ситуации организуется как игра с неполной информацией для патрулирующей стороны и бесконечным числом ходов и полной информацией для нарушителя. В работе исследуется абстрактная модель, в которой игроки ходят по очереди, среда моделируется в виде взвешенного графа. Патрулирующий агент в каждый момент времени находится в некоторой вершине графа, и его ходом является переход по любому инцидентному своему текущему положению ребру, на который тратится одна единица времени. Ходом нарушителя может быть отсутствие хода либо выбор вершины, на которую совершить нападение. В случае если нарушитель атаковал вершину, он находится в ней соответствующее данной вершине количество времени, необходимое для взлома. Если за данное время нарушитель остается незамеченным, он получает выигрыш, равный параметру важности данной вершины. Если же злоумышленник попадает, выигрыш, равный единице, получает

патрулирующий. Система наблюдения моделируется как множество сигналов, которые могут срабатывать с разной вероятностью, в зависимости от вершины графа, в которой находится злоумышленник. Авторы делают несколько допущений о системе наблюдения:

- система не имеет ложноположительных срабатываний – если атака не была совершена, вероятность срабатывания любого сигнала равна нулю;
- система не имеет ложноотрицательных срабатываний – если атака была совершена, то вероятность, что ни один сигнал не сработает, равна нулю.

Для каждой пары вершина–сигнал априори задается вероятность того, что именно данный вид сигнала сработает при атаке злоумышленника на данную вершину. После того как злоумышленник совершает атаку на вершину, перемещается только патрулирующий. Авторы работы анализируют два вида задач:

1. Определить правильную стратегию патрулирующего, находящегося в момент нападения в заданной вершине;

2. Определить правильную стратегию патрулирующего, выполняющего непрерывный обход графа еще до нападения.

Первая задача исследуется на предмет алгоритмической сложности, рассмотрены несколько вариантов приближенных и точных решений. Также рассмотрены оптимальные алгоритмы для некоторых специфических видов графов. Относительно второй задачи в работе доказана теорема, утверждающая, что оптимальная стратегия патрулирования заключается в том, чтобы оставаться все время в одной вершине, пока не сработает какой-либо сигнал системы наблюдения. После срабатывания сигнала необходимо воспользоваться решением первой задачи.

В работе [7] рассмотрена геометрическая постановка задачи с круговым охраняемым периметром заданного радиуса. При этом вычисляется вероятность обнаружения нарушителя одним из аппаратов, в зависимости от количества аппаратов в охранной группе. Задача сводится к одной из классических задач теории вероятностей – задаче Бюффона о бросании иглы. В данном случае иглой моделируется траектория движения нарушителя и вычисляется вероятность пересечь одну из движущихся окружностей, которые обозначают границы обзора подводных аппаратов.

Задача охраны порта с помощью автономных необитаемых водных аппаратов (АНВА (Autonomous Surface Vehicles – ASV)) рассмотрена в [8]. В постановке задачи участвует заданная геометрическая область с расположенными объектами, для которых необходимо предотвратить вторжение нарушителей с помощью группы АНВА. Для каждого объекта установлен порог минимального расстояния, на которое нарушитель может приближаться. Исследовано две стратегии группового поведения. В одной из них оптимизация группового поведения состоит из нескольких шагов. На первом шаге решается задача об оптимальной расстановке всех задействованных аппаратов. На этом шаге оптимизируется худшее время перехвата по всем возможным положениям нарушителя, задающимся заранее. Задача сводится к известной задаче пространственного распределения ресурсов. На втором шаге решается задача, в которой известно положение найденного нарушителя в данный момент и линейная модель его движения к одному из объектов. Нарушителю приписывается аппарат с наименьшим временем перехвата, которое вычисляется с учетом возможных препятствий.

Во второй стратегии используется децентрализованный подход к патрулированию заданной акватории, который более устойчив к эпизодическим пропаданиям связи между аппаратами. Задача заключается в прогнозировании некоторой функции в указанный момент времени в заданной координате. Функция имеет смысл уровня опасности в точке, значение которой может быть измерено датчиками аппарата. Предполагается, что показания функции во времени распределены согласно совместному нормальному закону и тогда данную функцию можно исследовать как гауссовский процесс. На каждом шаге аппараты вычисляют диаграмму Вороного, в которой свою ячейку каждый аппарат может определить однозначно, зная координаты соседей, что позволяет выполнять это децентрализованно. Далее каждый аппарат выбирает себе путевую точку, оптимизируя неопределенность для оценки вышеописанной функции. Приведенные выше шаги выполняются периодически.

В работе [45] рассмотрена проблема инспектирования границ морских акваторий при оперативном мониторинге водной среды и морского дна в охраняемых территориях. Предложены два способа решения задачи с учетом навигационного обеспечения групповой работы подводных аппаратов. Первый способ состоит в организации движения каждого АНПА вдоль границы, заданной последовательностью координат точек, лежащих на линии границы. Второй способ предполагает организацию движения группы АНПА вдоль линии границы, определенной изобатами на батиметрической карте, которые соответствуют контуру заданной области обследования. Решение задачи маршрутизации для группы АНПА при патрулировании и инспектировании, основанное на использовании генетических

алгоритмов и топологий взвешенных графов, предложено в [46].

2. МРК и системы для обеспечения групповых операций

Одним из широко используемых при выполнении групповых морских экспериментов с МРК является разработанный в IST/ISR Лиссабонского университета АНПА Medusa [9]. Программная архитектура АНПА Medusa включает пять основных модулей, которые работают под управлением Robot Operating System (ROS). Изготовлено три таких аппарата, которые принимали участие в нескольких европейских проектах, связанных с отработкой коллективных операций. Проект Co3-AUVs (2008–2011) [10] был посвящен разработке, реализации и проверке работы системы координации и группового управления командой из разнородных МРК. В рамках этой обобщенной темы исследовались вопросы 3D восприятия и картографирования, использования информации из разных источников для комплексного описания среды, принятия решения и навигации. Окончательная демонстрация включала как автономную работу группы МРК в бухте, так и совместные операции с дайверами.

Основная идея проекта MORPH [11] (2011–2015) заключалась в использовании гибкой приспособленной к среде группы из пяти автономных аппаратов, имеющих разные роли и специфические характеристики, для картографирования в подводной среде, включая сложные участки с отвесными скалами. Целью исследования была разработка альтернативной экономической технологии по сравнению с дорогим традиционным методом, в которой для съемки используется один тяжелый АНПА, оснащенный уникальным оборудованием. При традиционном подходе име-

ется большой риск срыва работы при выходе из строя аппарата. При использовании группового метода тот же набор датчиков может быть распределен между аппаратами, что уменьшает риск невыполнения операции в целом при выходе из строя отдельного аппарата.

Целью проекта CADDY [12] (2014–2016) была разработка комплекса, предназначенного для повышения производительности работы дайвера и снижения риска его работы под водой. Комплекс включает два автономных аппарата – подводный и движущийся по поверхности. Основной особенностью комплекса является наличие возможности отслеживать, изучать и реагировать на поведение дайвера. Разработка гибкой системы из нескольких АНПА для формирования масштабируемых гидрофонных антенных решеток была целью проекта WiMUST [13] (2015–2017). Геологические изыскания требуют поддержания точной геометрии между акустическим источником и приемниками. В таких изысканиях обычно используются буксируемые судами косы с гидрофонами. Однако при наличии течений сложно организовать необходимые траектории движения гидрофонов в косах. Использование предложенной системы позволит поддерживать необходимую геометрию антенной решетки посредством управляемого движения АНПА и в перспективе реализовать регулируемую в реальном времени апертуру антенны и формировать сложную траекторию движения данной антенны для морских геологических изысканий.

АНПА Ocean Explorer (OEX) [14] также предназначен для выполнения работы в составе группы. Связь между подводными аппаратами в группе осуществляется с помощью гидроакустических модемов Evologics [15]. Навигация аппаратов обеспечивается на основе системы с ультракороткой базой

Evologics. Система программного управления аппарата функционирует на базе MOOS-IvP [16]. Данный комплекс предоставляет средства для кооперативного взаимодействия и планирования миссий, обеспечивает объединение сенсорных данных от всех аппаратов и является распространенным бортовым открытым программным комплексом для подводных аппаратов.

Для работы в группе разнородных морских роботов, включающих и беспилотные летательные аппараты (БЛА), используются АНПА LAUV [17]. В них реализована разработанная в лаборатории LSTS университета Порто система, включающая программные средства для управления группой роботов Dune и Neptus [18]. Каждый аппарат выступает в качестве исполнителя некоторого задания. Распределение заданий осуществляет оператор. Для автоматического планирования используется планировщик T-REX [19], который реализует процедуру логического вывода для построения плана. Данные аппараты оснащены радиомодемом для связи с оператором (на борту судна или на берегу), АНПА и БЛА, а также гидроакустическим модемом для связи между АНПА. Также на всех аппаратах используется модуль Iridium для связи со спутником.

Для навигации данные аппараты могут быть оснащены LBL/USBL системой, на поверхности используются GPS приемники. В последних работах разработчики указывают, что программный пакет IMC позволяет агентам объединяться в децентрализованную самоорганизующуюся сеть аппаратов VANET [20]. Как правило, АНПА выполняет роль узла, собирающего данные и занимающегося планированием. Связь с ним может быть осуществлена с помощью беспилотного летательного аппарата. Описанный комплекс позволяет осуществлять обзор-

но-поисковые океанографические и военные миссии на небольших (до 100 м) глубинах. Благодаря открытой и универсальной программной части рассмотренный комплекс может включать и другие аппараты, способные работать на больших глубинах [21].

Еще одним МРК, предназначенным для групповой работы, является комплекс МАРК. В минимальной конфигурации он состоит из двух аппаратов – АНПА и АНВА. Для связи АНВА с оператором используется радиосвязь, а между собой аппараты обмениваются информацией с помощью гидроакустического модема Evologics. Увеличение скорости выполнения миссии при использовании группы данных МРК достигается путем разбиения общей задачи на составные части (неделимые задания). Сформированные неделимые задания выполняются параллельно различными аппаратами, что позволяет оптимизировать время выполнения миссии в целом. Надежность или вероятность успешного выполнения миссии обеспечивается контролем ее выполнения и корректировкой в случае возникновения внеплановых ситуаций. Для этого используется планировщик, имеющий информацию о миссии и о ходе ее выполнения в режиме реального времени. Для успешной работы всего механизма группового управления необходима передача от центрального узла каждому АНПА его плана, а от каждого аппарата центральному узлу – передача сообщений о начале выполнения задания, об окончании выполнения задания и периодических сообщений, подтверждающих активность аппарата.

В работах [22–25] показано, как может быть решена задача поиска локальных неоднородностей морской среды при использовании группы АНПА. В статьях [26, 27] рассмотрена задача измерения с требуемой точностью указанных

параметров водной среды с помощью группы АНПА посредством формирования адаптивных траекторий, формируемых в режиме реального времени на основе текущей информации об измеряемом поле.

Неделимое задание для АНПА может заключаться в выполнении определенного галса, покрытия заданного участка меандром, следовании вдоль протяженного объекта, возвращении в точку старта и т. д. При планировании операции существенным является время выполнения задания и время, необходимое для переходов между заданиями. Таким образом, для каждого задания необходимо знать место начала его выполнения, место окончания его выполнения и время, необходимое для его выполнения. В случае если некоторые из этих параметров неизвестны (например, время, необходимое для выполнения галса в процессе адаптивного формирования траектории), следует получить их оценку и использовать ее при планировании.

Поставленная задача близка к задаче коммивояжера (*travelling salesman problem – TSP*). Для нее разработаны как точные, так и приближенные методы, многие из которых могут быть обобщены и для поставленной задачи [22]. Обобщение «аукционных» методов и методов, использующих динамическое программирование, а также генетические алгоритмы, решающие TSP, также могут быть модифицированы для решения поставленной задачи [25].

При выполнении групповых миссий важной задачей является навигационное обеспечение аппаратов. Одним из примеров групповой навигации является обеспечение навигации АНПА с помощью АНВА, транспортирующего мобильный гидроакустический маяк. В работах [28–31] исследованы алгоритмы оценивания местоположения АНПА, использующие инфор-

мацию о дальности до мобильного гидроакустического маяка и данные бортовой автономной навигационной системы. Рассмотрены алгоритмы, основанные на применении расширенного фильтра Калмана и использовании фильтра частиц. Приведены данные моделирования работы рассмотренных алгоритмов и некоторые результаты морских испытаний.

В статьях [32, 33] рассмотрена задача определения неизвестного начального местоположения АНПА на основе информации о дальности до одного мобильного гидроакустического маяка, который транспортируется АНВА. Для определения неизвестного начального местоположения АНПА организуется его зависание над дном на основе данных от бортовой системы технического зрения. Для решения поставленной задачи рассмотрены три алгоритма – на основе метода наименьших квадратов, с использованием метода трилатерации и с перебором вариантов решений в заданной области. Приведены некоторые результаты работы рассмотренных алгоритмов, полученные в процессе морских испытаний с использованием морского автономного робототехнического комплекса МАРК, включающего АНПА и АНВА.

Работы [34, 35] посвящены вопросу исследования точности навигации, основанной на использовании одного мобильного гидроакустического маяка, установленного на АНВА. Для определения с требуемой точностью текущего местоположения мобильного маяка транспортирующей его АНВА оборудован комбинированным приемником спутниковой навигационной системы (DGPS). С использованием модемной гидроакустической связи АНПА и АНВА обмениваются пакетами данных, а также определяют взаимную дальность на основе измеряемого времени распространения акустического сигнала.

Особенности реализации одно-маяковой мобильной навигации для подводного аппарата ММТ-3000 [36] обсуждены в [37]. Рассмотрена гидроакустическая навигационная система с синтезированной длинной базой, использующая одну буксируемую судовую антенну в качестве навигационного маяка. Приведены некоторые результаты мелководных морских испытаний разработанной навигационной системы. В работах [38, 39] представлены результаты работы одномаяковой мобильной системы навигации АНПА «ММТ-3000» при проведении глубоководных инженерно-исследовательских работ на протяженных глубоководных трассах.

В статье [40] описан подход, при котором для обеспечения навигации группы АНПА используются как измерения дальностей до мобильного гидроакустического маяка, так и измерения дальностей между отдельными АНПА в группе. Рассмотрен алгоритм формирования траектории движения мобильного маяка, позволяющий минимизировать ошибку определения местоположения для случая трех совместно работающих АНПА. Приведены некоторые результаты моделирования работы рассмотренных алгоритмов.

3. Примеры решения задачи охраны водных акваторий с помощью МРК

В натурном эксперименте по охране порта, выполненном в закрытом водоеме вблизи ЭКСПО-центра в Лиссабоне [8], использовались три аппарата Medusa. Размеры

охраняемой акватории составляли 60×70 м. На аппаратах было реализовано и продемонстрировано работоспособность алгоритмическое обеспечение, описанное в разд. 2.

В работе [14] показано использование АНПА ОЕХ в экспериментах, посвященных решению задачи охраны заданных акваторий. В комплексе используется мультистатическая система гидролокации DEMUS [41] с одним источником сигнала, расположенным на судне или бусе, и несколькими приемниками в виде гибких буксиремых гидроакустических антенн SLITA [42], которыми оборудованы аппараты ОЕХ.

Эксперимент в реальных условиях, проведенный лабораторией LSTS университета Порто совместно с исследовательским центром NATO CMRE, описан в [43]. Данный эксперимент состоял из различных разведывательных миссий. В операции участвовали 6 АНПА LAUV, 3 беспилотных летательных аппарата (БЛА) и автономный водный аппарат (АНВА) Caravela.

Практические вопросы решения задачи противолодочной обороны рассмотрены в [44]. В рамках этой работы исследуется модель задачи отслеживания множественных целей. Предполагается, что каждый подводный аппарат в группе оборудован гидроакустической гибкой протяженной буксиремой антенной и объединен в сети с источником гидролокационного сигнала, расположенном на судне

либо бусе. Каждый аппарат в группе играет роль приемника сигнала, отражающегося от различных целей, некоторые из которых могут оказаться враждебными. Необходимо обеспечить обнаружение и максимизировать точность локализации враждебных целей на протяжении некоторого периода миссии.

Авторы рассматривают ряд сложностей, таких как обнаружение траекторий, не соответствующих необходимым целям (из-за неоднозначности локализации с использованием буксиремых антенн), потеря сигнала от необходимых целей на некоторое время. В подобных ситуациях необходимо организовать движение аппаратов, опираясь на получаемые в реальном времени данные, с целью уменьшения погрешности локализации наиболее интересных траекторий, с целью уменьшения вероятности потери отраженного от объекта сигнала, с целью повторного захвата цели, если сигнал был потерян на некоторое время.

В реальных экспериментах использовались мультистатическая система подводного наблюдения DEMUS и неподвижный источник сигнала, расположенный на дне. В эксперименте принимали участие два аппарата ОЕХ, оборудованные буксиремыми антеннами и гидроакустическими модемами.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00034) и программы «Дальний Восток» (раздел 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ferri G., Munafò A., Tesei A., Braca P., Meyer F., Pelekanakis K., Petrocchia R., Alves J., Strode C., LePage K. Cooperative robotic networks for underwater surveillance: an overview // IET Radar Sonar & Navigation. 2017. No. 11(12). P. 1740–1761.
2. Автономные подводные роботы: системы и технологии / под ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 398 с.
3. Ageev M.D., Bliedberg D.R., Gornak V.E., Khmelkov D.B., Scherbatyuk A.Ph., Vaulin Ju.V. Mission Control System for Solar AUV and Results of the Vehicle Long Time Operation Trials // Proc. of the 11th Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology. New Hampshire, 2001.
4. Костенко ВВ, Львов О.Ю. Комбинированная система связи и навигации автономного подводного робота с поплавковым модулем // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 1. С. 31–43.
5. Agmon N., Kraus S., Kaminka G.A. Multi-robot perimeter patrol in adversarial settings // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). 2008. С. 2339–2345.
6. Basilio N., De Nittis G., Gatti N. Adversarial patrolling with spatially uncertain alarm signals // Artificial Intelligence. 2017. No. 246. P. 220–257.
7. Гузев М.А., Цициашвили Г.Ш., Осипова М.А., Спорышев М.С. Вероятность обнаружения постороннего мобильного объекта автономными необитаемыми подводными аппаратами как решение задачи Бюффона // Дальневост. математический журнал. 2017. No. 17(2). P. 191–200.

8. Antonelli G., Arrichiello F., Casalino G., Chiverini S., Marino A., Simetti E., Torelli S. Harbour Protection Strategies with Multiple Autonomous Marine Vehicles // Proc. of MESAS2014, LNCS8906. Rome, Italy, 2014. P. 241–261.
9. Abreu P.C., Botelho J., Gois P., Pascoal A. The MEDUSA class of Autonomous Marine Vehicles and their Role in EU Projects // Proc. of MTS/IEEE OCEANS 2016. Shanghai, China, 2016.
10. Birk A., Antonelli G., Caiti A., Casalino G., Indiveri G., Pascoal A., Caffaz A. The CO3AUVs (Cooperative Cognitive Control for Autonomous Underwater Vehicles) project: Overview and current progresses // Proc. of OCEANS 2011 IEEE. Santander, Spain, 2011. P. 1–10.
11. Kalwa J., Pascoal A., Ridaou P., Birk A., Eichhorn M., Brignone L., Caccia M., Alvez J., Santos R. The European R&D-project MORPH: Marine robotic systems of self-organizing, logically linked physical nodes // Proc. of 3rd IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles NGCUV 2012. Porto, Portugal, 2012. Vol. 3, No. 1. P. 349–354.
12. Miskovic N., Bibuli M., Birk A., Caccia M., Egi M., Grammer K., Marroni A., Neasham J., Pascoal A., Vasilijevic A., Vukic Z. Overview of the FP7 project “CADDY – cognitive autonomous diving buddy” // Proc. of OCEANS 2015. Genova, Italy, 2015. P. 1–5.
13. Al-Khatib H., Antonelli G., Caffaz A., Caiti A., Casalino G., Bielic de Jong I., Duarte H., Indiveri G., Jesus S., Kebkal K., Pascoal A., Polani D. The widely scalable mobile underwater sonar technology (WiMUST) project: An overview // Proc. of OCEANS 2015. Genova, Italy, 2015. P. 1–5.
14. Bovio E. Autonomous underwater vehicles for port protection // Proc. of the Int. Conf. on New Concepts for Harbour Protection, Littoral Security and Shallow-Water Acoustic Communication. Istanbul, Turkey, 2005.
15. EvoLogics Underwater acoustic modems. – URL: <https://www.evologics.de/en/products/acoustics/technology.html> (дата обращения: 11.10.2018).
16. MOOS-IvP is a set of open source C++ modules for providing autonomy on robotic platforms, in particular autonomous marine vehicles. – URL: <http://oceanai.mit.edu/moos-ivp/pmwiki/pmwiki.php?n=Main.HomePage> (дата обращения: 11.10.2018).
17. Index of /light-autonomous-underwater-vehicle. – URL: <http://www.oceanscan-mst.com/light-autonomous-underwater-vehicle> (дата обращения: 11.10.2018).
18. Faria M., Pinto J., Py F. et al. Coordinating UAVs and AUVs for Oceanographic Field Experiments: Challenges and Lessons Learned // Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation 2014 (ICRA-2014). Hong Kong, 2014. P. 6606–6611.
19. Ferreira. H., Martins R., Marques E. et al. Swordfish: an autonomous surface vehicle for network centric operations // Proc. Europe MTS/IEEE Conf. Oceans 2007. Aberdeen, Scotland, 2007. P. 1–6.
20. Ferreira A.S. et al. The LSTS software toolchain for persistent maritime operations applied through vehicular ad-hoc networks // Proc. of IEEE Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Miami, USA, 2017. P. 609–616.
21. Ludvigsen M. et al. Network of heterogeneous autonomous vehicles for marine research and management // Proc. of OCEANS 2016 MTS/IEEE. Monterey, 2016.
22. Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Разработка алгоритмов группового поведения АНПА в задаче обследования локальных неоднородностей морской среды // Управление большими системами. 2012. Вып. 36. С. 262–284.
23. Scherbatyuk A.Ph., Tuphanov I.E. Algorithms for Underwater Local Heterogeneity Survey Based on AUV Group Usage // Proc. of the OCEANS 2012 MTS/IEEE Conf. Yeosu, Korea, 2012. ISBN CD-ROM: 978-1-4577-2090-1.
24. Tuphanov I.E., Scherbatyuk A.F. Designing Group Behavior Algorithms for Autonomous Underwater Vehicles in the Underwater Local Heterogeneities Survey Problem // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76, No. 5. P. 885–896.
25. Scherbatyuk A., Sporyshev M. Comparison of Some Algorithms for Centralized Planning of AUV Group Operation for Local Heterogeneities Survey // Proc. of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Conf. Shanghai, China, 2016. ISBN: 978-1-4673-7164-3.
26. Tuphanov I.E., Scherbatyuk A. Ph. Adaptive Algorithm of AUV Meander Pattern Trajectory Planning for Underwater Sampling // Proceedings of the Tenth (2012) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. Vladivostok, Russia, 2012. ISBN 978-1-88065-393-7. ISSN 1946-004X.
27. Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Об алгоритмах высокоточного измерения параметров водной среды, основанных на использовании группы АНПА // Управление большими системами. 2013. Вып. 43. С. 254–270.
28. Scherbatyuk A.Ph., Dubrovin F.S. Some Algorithms of AUV Positioning Based on One Moving Beacon // Proc. of the IFAC Workshop Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles. FEUP, Porto, Portugal, 2012.
29. Gatcenko A., Dubrovin F., Scherbatyuk A. Some Results of Marine Trials for Mobile AUV Navigation with a Single Moving Beacon // Proc. of the 21th Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg, Russia, 2014. P. 65–72. ISBN 978-5-91995-032-5.
30. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.Ph. Development of Algorithms for an Autonomous Underwater Vehicle Navigation with a Single Mobile Beacon: The Results of Simulations and Marine Trials // Proc. of the 22th Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg, Russia, 2015. P. 144–152.
31. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. Studying some algorithms for AUV navigation using a single beacon: The results of simulation and sea trials // Gyroscopy and Navigation. 2016. Vol. 7, Iss. 2. P. 189–196. ISSN: 2075–1087.
32. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.Ph., Vaulin Yu.V. About Unknown Initial AUV Position Estimation Using One Beacon Mobile Navigation System // Proc. of the 23th Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg, Russia, 2016. P. 414–421. ISBN 978-5-91995-037-0.
33. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F., Vaulin Yu.V. Some algorithms for determining an unknown initial position of AUV using information from a single beacon navigation system // Gyroscopy and Navigation. 2017. Vol. 8, Iss. 3. P. 209–216. ISSN: 2075–1087.
34. Scherbatyuk A., Dubrovin F. About Accuracy Estimation of AUV Single-Beacon Mobile Navigation Using ASV, Equipped with DGPS // Proc. of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Conf. Shanghai, China, 2016. ISBN 978-1-4673-7164-3.
35. Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. О методе оценивания точности работы одноплатформенной мобильной навигационной системы подводного аппарата с помощью водного аппарата, оснащенного DGPS // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 1. С. 31–40.
36. Горнак В.Е., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф. MMT-3000 – новый малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат ИПМТ ДВО РАН // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 1(3). С. 12–20.
37. Vaulin Yu.V., Matvienko Yu.V., Scherbatyuk A.F. Positioning of the Autonomous Underwater Vehicle MMT-3000 // Proc. of the 14th Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg, Russia, 2007. P. 251–256.
38. Вaulin Yu.V., Dubrovin F.S., Щербатюк А.Ф. интегрированная система навигации и связи АНПА «ММТ-3000» и опыт ее использования в работах на глубоководных протяженных трассах // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 2. С. 14–19.
39. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F., Vaulin Yu.V. Some results of operation for the AUV MMT 3000 mobile navigation system on long and deep water trajectories // Proc. of the OCEANS 2018 MTS/IEEE Conf. Kobe, Japan, 2018. ISBN: 978-1-5386-1653-6.
40. Scherbatyuk A., Sergeenko N., Dubrovin F. Some Algorithms of Cooperative AUV Navigation with Mobile Surface Beacon // Proc. of the OCEANS 2013 MTS/IEEE Conf. San Diego, USA, 2013.
41. Been R., Hughes D.T., Vermeij A. Heterogeneous underwater networks for ASW: technology and techniques // Proc. of Underwater Defence Technology (UDT). Sydney, Australia, 2008.
42. Alain M. SLITA: A new slim towed array for AUV applications // Journ. of the Acoust. Soc. of America. 2008. Vol. 123, Iss. 5.
43. Ferreira A.S. Rapid Environmental Picture Atlantic exercise 2016: Field report // Proc. of OCEANS 2017 IEEE Conf. Aberdeen, Scotland, 2017. P. 1–7.
44. Ferri G., et al. Towards fully autonomous underwater vehicles in ASW scenarios: An adaptive, data driven AUV mission management layer // Proc. of OCEANS 2015 IEEE Conf. Genova, Italy, 2015.
45. Киселев Л.В., Медведев А.В. Траекторное обследование границ морских акваторий группой автономных подводных роботов // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2018. № 3. С. 185–197.
46. Бычков И.В., Кензин М.Ю., Максимкин Н.Н., Киселев Л.В. Эволюционные модели маршрутизации группового движения автономных подводных роботов при много-целевом динамическом мониторинге морских акваторий // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 2 (18). С. 4–12.