

УДК 626
DOI 10.17285/0869-7035.0041

В. С. БЫКОВА, Л. А. МАРТЫНОВА, А. И. МАШОШИН, И. В. ПАШКЕВИЧ

ДИСПЕТЧЕР МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА: СТРУКТУРА, АЛГОРИТМЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приводится описание алгоритмов, реализуемых диспетчером мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). Алгоритмы построены по модульному принципу, что позволяет, с одной стороны, контролировать выполнение широкого круга задач, возлагаемых на АНПА, а с другой – максимально упростить реализацию каждого алгоритма.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, система управления, алгоритмы управления.

Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективным средством исследования и освоения Мирового океана [1–8].

Наиболее актуально применение АНПА в районах, покрытых льдом, а также на больших глубинах, недоступных для подводных лодок.

Особое место среди АНПА занимают аппараты тяжелого класса, которые могут взять на себя многие функции, традиционно возлагавшиеся на специализированные надводные суда и подводные лодки. К этим функциям относятся:

- поиск полезных ископаемых на морских шельфах;
- доставка грузов в труднодоступные районы;
- прокладка подводных линий связи;
- поиск затонувших кораблей и самолетов;
- экологический мониторинг Мирового океана;
- исследование морской флоры и фауны;
- проведение подводных археологических исследований;
- охрана территориальных вод от несанкционированного вторжения иностранных подводных объектов;
- поиск и уничтожение морских мин, в том числе заиленных.

Тяжелые АНПА могут эффективно использоваться также в военной сфере, поскольку их применение хорошо вписывается в концепцию сетцентрической войны на море, возобладавшую в мире в последние десятилетия [9–11].

Быкова Валентина Сергеевна. Инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Мартынова Любовь Александровна. Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Машошин Андрей Иванович. Доктор технических наук, начальник научно-исследовательского центра «Интегрированные системы освещения обстановки», АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Пашкевич Иван Владимирович. Главный специалист по разработке гидроакустики АНПА, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Поскольку АНПА являются автономно действующими подводными роботами, их создание сопряжено с решением значительного количества научно-технических проблем. При этом одним из ключевых вопросов является создание эффективной системы управления, назначение которой – обеспечить максимально точное выполнение предварительно загруженного маршрутного задания, представляющего собой разработанный человеком-оператором набор формализованных инструкций, привязанных ко времени и географическим координатам [12].

Вместе с тем использование с этой целью системы управления затруднено по целому ряду причин – как внешних, так и внутренних. К внешним относятся:

- отклонение АНПА от заданного маршрута, обусловленное погрешностями навигации;
- опасность столкновения с подводными объектами;
- обнаружение неподвижных препятствий (подводных хребтов и др.), не нанесенных на навигационную карту, которые нужно обойти;
- непредвиденное изменение скорости и/или направления течения, влекущие за собой изменения параметров движения АНПА;
- изменение границ ледового покрова, что препятствует всплытию для обсервации в назначенное время.

Большинство из перечисленных факторов приводит к дополнительным временным и энергетическим затратам и, в конечном счете, к необходимости корректировки маршрутного задания. Ситуация еще более осложняется в условиях преднамеренного противодействия выполнению миссии, что имеет место при применении АНПА в специальных операциях.

Внутренними факторами являются неустраняемые неисправности аппаратной части АНПА и невозстановливаемые сбои программного обеспечения, что также приводит к необходимости корректировки маршрутного задания, а в ряде случаев и к прекращению миссии.

Перечисленные негативные факторы, а также необходимость учитывать объем запасов электроэнергии, скорость хода, точность автономной навигации, дальность гидроакустической связи существенно затрудняют принятие эффективного решения, обеспечивающего достижение цели миссии. По этой причине система управления АНПА должна обладать способностью реализовывать сложные адаптивные алгоритмы с элементами искусственного интеллекта. И здесь возникает еще одна проблема. Формализованных методик синтеза подобных алгоритмов на сегодняшний день не существует. Есть только общие рекомендации по принципам их построения [13]. Такие алгоритмы во многом являются эвристическими, что переносит трудности с их разработки на их практическую отработку, а это противоречит сложившейся в России практике создания сложной техники.

Система управления АНПА отличается наивысшей сложностью, обусловленной необходимостью управлять в реальном времени большим количеством разнородных технических средств в полностью автоматическом режиме в условиях непрерывно меняющейся, зачастую агрессивной внешней среды и при ограниченных возможностях автономной подводной навигации и связи с пунктом управления [14].

Подходам к созданию системы управления АНПА как в России [14–24], так и за рубежом [25–64] посвящено большое число публикаций, которое постоянно растет.

Как неоднократно отмечалось [14, 26], построить централизованную (мультиобъектную) систему управления действиями всех технических средств АНПА весьма затруднительно. Особенно это касается больших (тяжелых) АНПА, которые предназначены для работы на значительных расстояниях от базы и в широком диапазоне глубин и оборудованы сложной радиоэлектронной аппаратурой и большим количеством технических средств. Для таких АНПА лучше подходит система управления с децентрализованной мультиагентной структурой [14, 26, 65, 66].

Данная структура предполагает, что каждая система АНПА является самостоятельным интеллектуальным агентом с собственной системой управления. Чтобы обеспечить слаженное взаимодействие агентов, предусмотрен специальный агент-диспетчер, который должен своевременно посылать задания (команды) системам управления АНПА. Для выполнения поступившей команды система АНПА может привлекать другие системы либо запрашивать у них данные.

Далее с учетом результатов выполнения отданных команд диспетчер формирует новые. Если в процессе осуществления миссии выясняется, что в силу возникших обстоятельств выполнить маршрутное задание в точном соответствии с первоначальным планом не представляется возможным, диспетчер корректирует его.

На рис. 1 приведена структурная схема мультиагентной системы управления АНПА тяжелого класса, включающая, кроме диспетчера, четыре радиоэлектронные системы (навигации, освещения обстановки, радиосвязи и позиционирования и гидроакустической связи и позиционирования), а также четыре технические системы (генерации и распределения электроэнергии, движительно-рулевая, дифферентовки, аварийной сигнализации). В качестве диспетчера технических систем выступает система управления техническими средствами (СУТС), куда передаются все сложные алгоритмы управления, что позволяет упростить работу центрального диспетчера. При необходимости перечень систем АНПА может быть расширен, например за счет системы сменной полезной нагрузки.

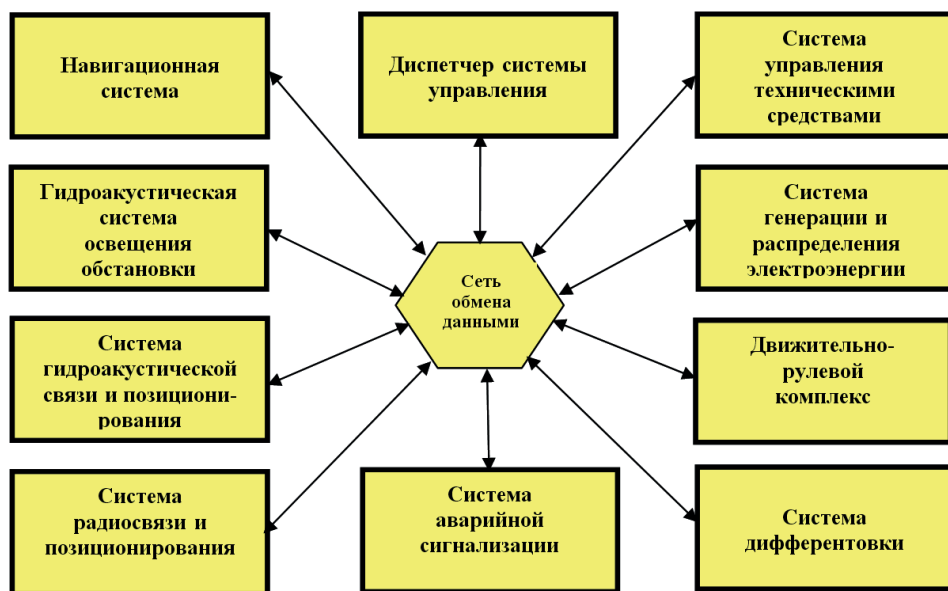


Рис. 1. Структурная схема мультиагентной системы управления АНПА

Обмен данными в системе управления АНПА осуществляется по сети, что позволяет каждой системе иметь доступ ко всем данным.

Как показал российский и зарубежный опыт, разработка универсальных АНПА, ориентированных на выполнение всех либо большинства перечисленных выше задач, по ряду причин нецелесообразна. В результате предпочтение отдается специализированным аппаратам либо аппаратам со сменной полезной нагрузкой. Тем не менее из-за сложности и высокой стоимости системы управления АНПА создание универсального диспетчера, который можно было бы применять в АНПА различного назначения с мультиагентной структурой системы управления, экономически оправдано.

В настоящей статье описывается алгоритмическая структура такого диспетчера. Его универсальность базируется на модульном принципе построения алгоритмов, позволяющем, с одной стороны, управлять выполнением широкого круга задач, возлагаемых на АНПА, а с другой – максимально упростить реализацию каждого алгоритма.

1. Алгоритмическая структура диспетчера

В основу алгоритмической структуры диспетчера заложены перечисленные ниже принципы.

1. Маршрутное задание, загружаемое в процессе подготовки к миссии в память диспетчера, содержит следующие формализованные документы:
 - описание маршрута АНПА в виде последовательности галсов, на которых аппарат движется с постоянными курсом, скоростью и глубиной погружения. Протяженность галсов не ограничена, что дает возможность в районах открытого моря описывать маршрут их небольшим количеством. Такой подход упрощает как составление маршрута, так и работу на нем системы управления АНПА в условиях воздействия описанных выше факторов, препятствующих точному выполнению маршрутного задания. В описание каждого галса при необходимости могут быть включены специальные задания, которые АНПА должен на нем выполнить. В перечень возможных заданий входят: обсервации различными способами, прием/передача сообщений по радио/гидроакустическому каналу, выполнение специальных программ (например, поиск затонувшего объекта, составление карт физических полей и др.);
 - описание поведения АНПА при выполнении специальной программы, если она предусмотрена маршрутным заданием;
 - таблица констант, обеспечивающих работу алгоритмов управления, например допустимой глубины погружения, максимально допустимой скорости хода, оптимального отстояния от дна при поиске донных объектов с помощью разных средств, максимально допустимое время выполнения каждого действия и т.п. Всего около сотни констант;
 - формализованное географическое, навигационно-гидрографическое и гидрометеорологическое описание района планируемого маршрута АНПА (границы береговой черты, глубины, параметры течений, гидроакустические условия, перечень доступных средств радионавигации);
 - график планового расхода электроэнергии при движении АНПА по заданному маршруту.

2. Для упрощения алгоритмов, реализуемых диспетчером, все системы АНПА поделены на радиоэлектронные (навигации, связи, освещения обстановки) и технические (генерации и распределения электроэнергии, движения). Радиоэлектронными системами (левый столбец на рис. 1) диспетчер управляет напрямую, а техническими (правый столбец на рис. 1) – через СУТС. В результате СУТС выполняет следующие функции:

- преобразование (с учетом модели движения) поступивших от диспетчера установленных параметров движения АНПА (курса, скорости, глубины) в управляющие команды, которые нужно отдать движительно-рулевому комплексу, системам генерации и распределения электроэнергии и дифферентовки;
- оптимизация потребления электроэнергии;
- определение и сообщение диспетчеру данных об оставшихся запасах электроэнергии;
- установление (с сообщением диспетчеру) ограничений скорости и глубины погружения АНПА с учетом вышедших из строя технических средств;
- трансляция поступивших от диспетчера команд на подъем/опускание антенны радиосвязи, включение/выключение различных манипуляторов, системы аварийной сигнализации.

3. В процессе выполнения миссии АНПА может находиться в одном из следующих состояний:

- движения и выполнения функций в режиме телеуправления, в котором функции диспетчера ограничены трансляцией в системы АНПА команд, поступивших по радио/гидроакустическому каналу связи с пункта управления, расположенного на берегу либо на судне сопровождения;
- аварийного прекращения миссии, обусловленного выходом из строя систем АНПА либо преждевременным израсходованием запаса электроэнергии;
- расхождения с обнаруженным подвижным подводным/надводным объектом;
- обхода обнаруженного неподвижного препятствия;
- выполнения специальной программы в назначенном районе;
- выполнения обсервации одним из следующих способов: по сигналам спутниковой навигационной и радионавигационной систем, региональной гидроакустической навигационной системы, донных и корабельных маяков-ответчиков, а также по подводным пассивным ориентирам, естественным геофизическим полям – батиметрическому, магнитному, гравитационному;
- выполнения сеанса связи по радиоканалу;
- движения по маршруту в соответствии с маршрутным заданием.

Состояния АНПА приведены в порядке убывания их значимости. Если при нахождении АНПА в определенном состоянии возникают условия для перехода в состояние с более высокой значимостью, то этот переход осуществляется сразу, до нормального выхода из текущего состояния. Если же возникают условия для перехода в состояние с более низкой значимостью, он откладывается и осуществляется только после выхода из текущего состояния. Данный подход значительно упрощает алгоритмы, реализуемые диспетчером.

4. Каждое состояние АНПА обслуживается отдельным алгоритмом, реализованным в виде независимого асинхронно функционирующего программного

модуля. В результате в каждый момент времени в соответствии с описанной выше логикой функции диспетчера выполняет тот алгоритм, который обслуживает текущее состояние. Когда АНПА переходит в другое состояние, функции диспетчера передаются соответствующему алгоритму.

Кроме названных, диспетчер включает ряд дополнительных постоянно функционирующих алгоритмов, например управления освещением подводной и надводной обстановки, контроля за расходом запасов электроэнергии, контроля работоспособности радиоэлектронных и технических средств АНПА.

Такая декомпозиция также позволяет упростить алгоритмы работы диспетчера.

5. В процессе выполнения маршрутного задания диспетчер взаимодействует с системами АНПА (рис. 1) (точнее, с их системами управления) с использованием формализованных информационных модулей. Для взаимодействия диспетчера с каждой конкретной системой используются два информационных модуля: для передачи данных в направлении от диспетчера к системе АНПА и в обратном направлении. Следует отметить, что благодаря мультиагентной структуре управления АНПА информационные модули содержат весьма ограниченный набор команд и данных.
6. Взаимодействие АНПА с пунктом управления осуществляется путем обмена формализованными сообщениями по радио- либо гидроакустическому каналу связи.

Пункт управления посылает АНПА сообщения трех типов:

- запрос текущего состояния аппарата;
- корректировка маршрутного задания;
- команда перехода в режим (выхода из режима) телеуправления.

Формализованное сообщение, которое отправляет АНПА на пункт управления по запросу либо по собственной инициативе, содержит:

- код состояния АНПА, например плановое выполнение маршрутного задания, результат выполнения специального задания, аварийное прекращение миссии с указанием причины;
- оставшийся запас электроэнергии;
- координаты АНПА;
- время последней обсервации;
- перечень условных номеров неисправных технических средств.

2. Результаты моделирования алгоритмов управления АНПА

Для отработки системы управления АНПА был создан стенд моделирования, структура его программного обеспечения (ПО) приведена на рис. 2. Блоки желтого цвета являются программными моделями систем АНПА. Блоки голубого цвета отвечают за моделирование входных сигналов антенн и датчиков АНПА с учетом гидроакустических условий распространения сигналов и помех, а также погрешностей их измерения. Каждый блок, независимо от того, какое ПО входит в его состав, имеет выход на отображение результатов моделирования.

Моделирование подвижных и неподвижных объектов предполагает расчет их движения и акустических полей (первичного и вторичного). Поведение подвижных объектов может быть как адаптивным (т.е. изменяться при обнаружении АНПА), так и неадаптивным (не изменяться).

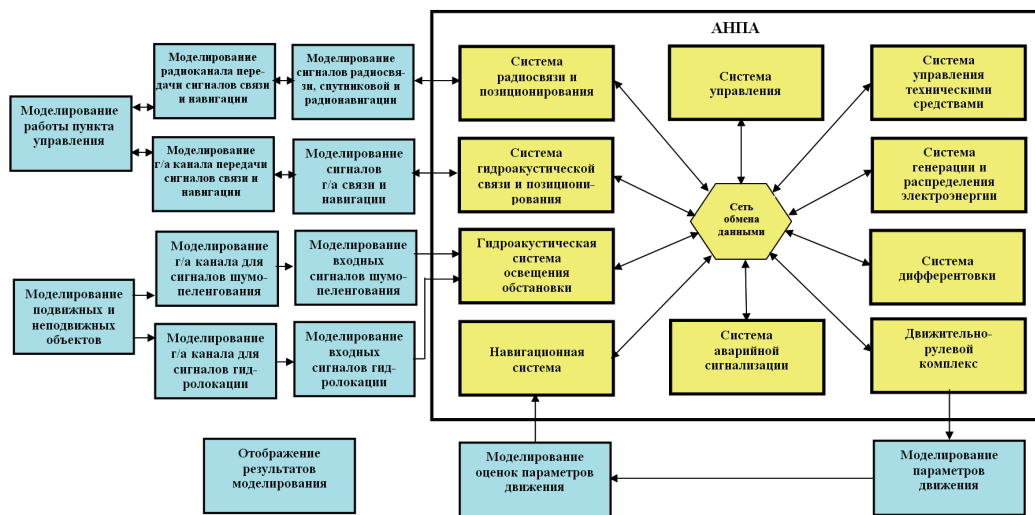


Рис. 2. Структура программного обеспечения стенда моделирования алгоритмов управления АНПА

В результате моделирования гидроакустического канала формируется лучевая структура шума объекта либо эхосигнала от него на входе приемных антенн гидроакустической системы освещения обстановки, а также лучевая структура шумов моря и собственные шумы АНПА, поступающие на вход приемных антенн. При этом учитываются гидроакустические условия в районе и текущее взаимное расположение объектов и АНПА.

Моделируются следующие функции пункта управления:

- разработка маршрутного задания;
- формирование и передача сообщений АНПА по радио/гидроакустическому каналу связи;
- прием сообщений от АНПА, поступивших по радио/гидроакустическому каналу связи;
- корректировка маршрутного задания;
- режим телеуправления АНПА.

Моделирование радио- и гидроакустических каналов передачи сигналов связи и навигации осуществляется с учетом гидрометеорологических условий в районе выполнения миссии и возможностей аппаратуры, установленной на АНПА и на пункте управления.

Моделирование движения АНПА осуществляется следующим образом. Диспетчер в соответствии с маршрутным заданием и с учетом сложившейся обстановки выдает СУТС параметры движения АНПА, которые нужно установить. СУТС с использованием кинематической модели АНПА вырабатывает команды, которые передаются техническим системам АНПА для выполнения поступившего задания. Затем в соответствующем блоке моделируются параметры движения АНПА, которые реально удалось установить с учетом ограничений и возникших неисправностей технических средств. К ним в блоке моделирования оценок параметров движения добавляются систематические и случайные погрешности, характерные для навигационных приборов. Оценки параметров движения поступают в навигационную систему, выполняющую с их использованием штурманскую прокладку.

Функционирование системы управления АНПА продемонстрируем на примере моделирования актуальной миссии, целью которой является обнаружение в удаленном районе затонувшего самолета.

АНПА, выйдя из базы, должен дойти до назначенного района и найти там затонувший самолет, определить его координаты и сообщить их на пункт управления по спутниковому каналу связи, после чего вернуться на базу. Планируемая длительность миссии – 94,3 часа, планируемая длина пути АНПА – 351,5 км. Глубина моря – 200 м. Ледовый покров отсутствует.

Маршрут АНПА состоит из трех галсов:

- движение из базы в назначенный район;
- поиск затонувшего самолета в назначенном районе;
- возвращение на базу.

Самолет предписано искать с помощью гидролокатора освещения обстановки во время движения по раскручивающейся спирали, начинающейся в точке предполагаемого нахождения самолета.

АНПА оборудован инерциальной навигационной системой навигационного класса точности. Каждые 24 часа аппарат должен определять свое место по сигналам спутниковой навигационной системы.

В ходе плавания, кроме целевой задачи миссии, АНПА должен решать описанные выше вспомогательные задачи, в частности контролировать запас электроэнергии и осуществлять обнаружение подвижных и неподвижных объектов с последующим расхождением с ними (обходом).

Результаты моделирования приведены на рис. 3 и 4.

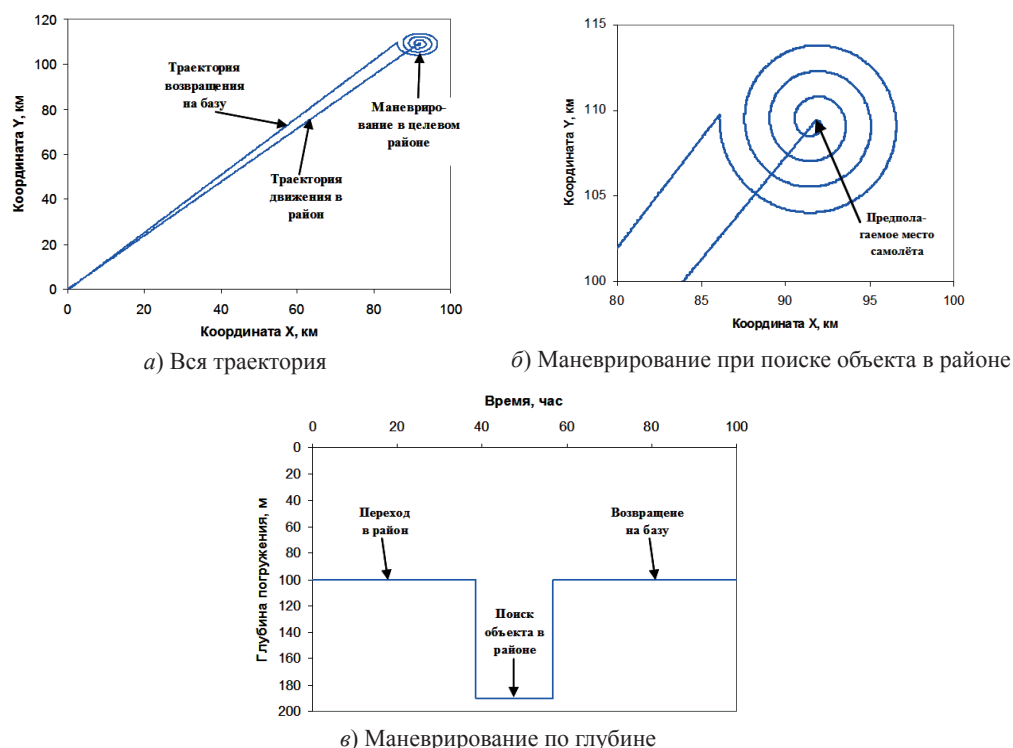


Рис. 3. Траектория АНПА в соответствии с маршрутным заданием

На рис. 3 показана траектория АНПА в соответствии с маршрутным заданием, состоящим из трех этапов: движения по прямой в район, маневрирования по раскручивающейся спирали в районе, движения по прямой обратно. Движение в район и обратно запланировано на глубине 100 м, маневрирование – на отстоянии 20 м от дна. Скорость на всех этапах – 2 уз.

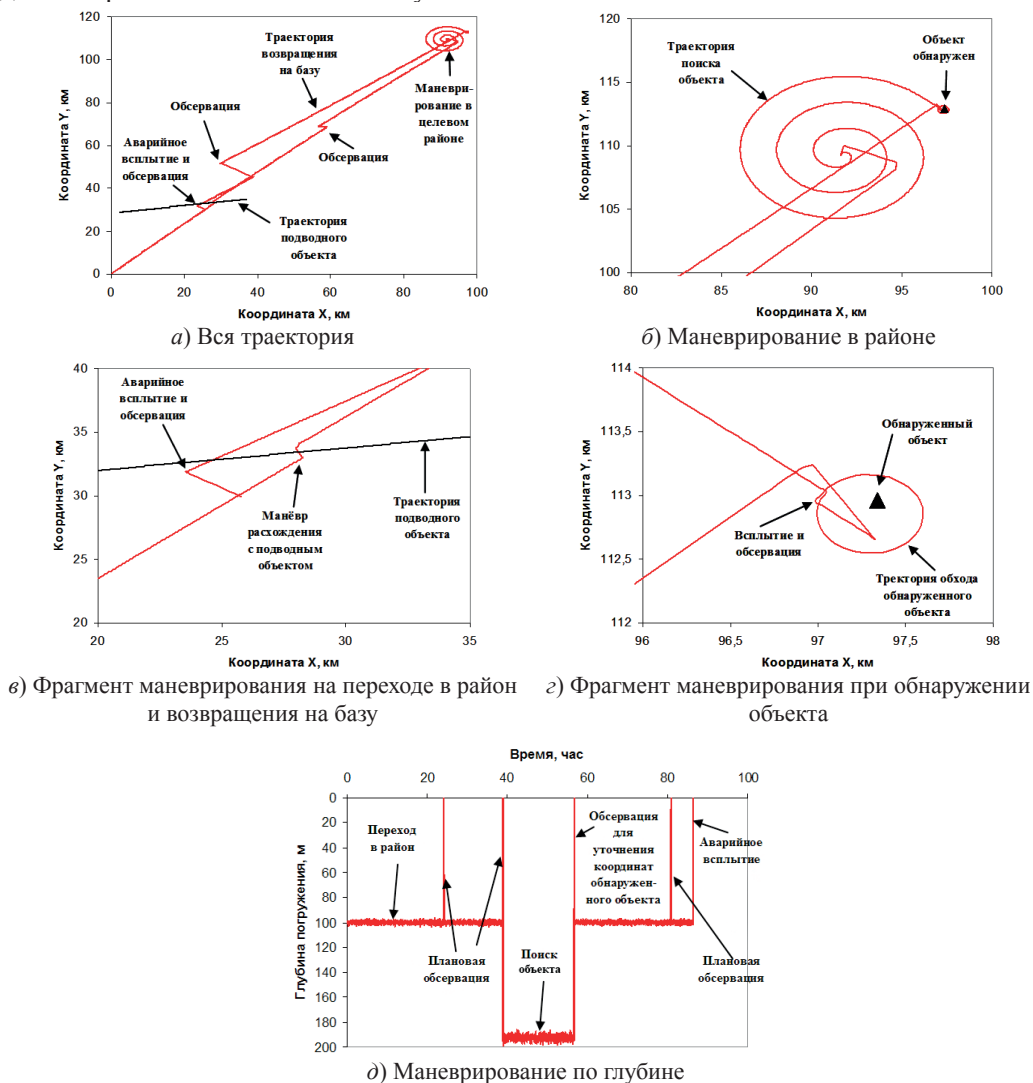


Рис. 4. Маршрут АНПА

На рис. 4 показан маршрут АНПА по данным его навигационной системы. Наблюдается ряд отличий от траектории на рис. 3:

- в силу погрешностей определения курса траектория АНПА заметно отклоняется вправо от заданной в маршрутном задании (рис. 4, а, в);
- несколько раз в результате наблюдения счислимое место АНПА корректировалось (рис. 4, а–д);
- в процессе движения в район был обнаружен подводный объект (рис. 4, в), столкновение с которым было возможно. Поскольку пеленг объекта медленно изменялся вправо, для расхождения с ним АНПА отвернул на 90° влево относительно пеленга;

- затонувший самолет обнаружен несколько раньше, чем предполагалось при разработке маршрутного задания (рис. 4, б);
- при обнаружении объекта, похожего на самолет, АНПА обходит его по окружности для уточнения его классификации (рис. 4, з), после чего всплывает, чтобы определить точные координаты объекта и сообщить их на пункт управления по спутниковому каналу связи. Затем ложится на курс возвращения на базу;
- на обратном маршруте траектория АНПА обрывается раньше, чем запланировано, что обусловлено аварийным прекращением миссии ввиду досрочного расходования запаса электроэнергии (рис. 4, а, в и з). Аварийное прекращение миссии предполагает всплытие АНПА на поверхность, выключение движительно-рулевого комплекса, включение системы аварийной сигнализации, уточнение своих координат по сигналам спутниковой навигации, периодическую передачу на пункт управления сообщения об аварийном прекращении миссии.

Заключение

Создание эффективной системы управления АНПА является одной из основных проблем в области подводной робототехники. Работы в данном направлении ведутся во многих развитых странах мира. Несмотря на это, на сегодняшний день приходится констатировать, что до окончательного решения проблемы еще далеко и работы по созданию алгоритмов, реализуемых в системах управления АНПА, необходимо продолжать.

В статье рассмотрена мультиагентная структура управления АНПА, при которой все его радиоэлектронные и технические средства являются интеллектуальными агентами со своими системами управления. Их взаимодействие, направленное на выполнение маршрутного задания, организуется диспетчером, представляющим собой сложный программный продукт.

Поскольку создание диспетчера системы управления АНПА – длительный и дорогостоящий процесс, целесообразна разработка универсального диспетчера, который может быть применен в АНПА различного назначения с мультиагентной структурой системы управления.

В статье описана алгоритмическая структура такого диспетчера, разработанного авторами. Его универсальность базируется на модульном построении алгоритмов, реализуемых диспетчером, которое позволяет, с одной стороны, контролировать выполнение широкого круга возлагаемых на АНПА задач, а с другой – максимально упростить реализацию каждого алгоритма.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00253).

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М.: Наука. 2005. 400 с.
2. Инзарцев А.В. и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. №2 (4). С. 5–14.
3. Боженков Ю.А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. №1. С. 4–68.
4. Millar, G., Mackay, L., Maneuvering Under the Ice, *Sea Technology*, 2015, vol.56, no. 4, pp. 35–38.
5. Гизитдинова М.Р., Кузьмицкий М.А. Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Т. 3. №1. С. 4–13.

6. **Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю.** Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. 304 с.
7. **Белюсов И.** Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2013. №5. С. 79–88.
8. **Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р.** Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. №3. С. 37–48.
9. **Cebrowski, A.K., Garstka, J.J.,** Network-centric warfare: its origins and future, *U.S. Naval Institute Proceedings*, 1998, №1.
10. **Баулин В., Кодратьев А.** Реализация концепции «сетевая война» в ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2009. №6. С. 61–67.
11. **Буренок В.М.** Организационный и научно-технический базис сетевых войн // Военный парад. 2010. №1. С. 14–17.
12. **Butler, H., Daly, M., Doyle, A., Gillies, S., Hagen, S., Schaub, T.,** The GeoJSON Format, RFC 7946, The Internet Engineering Task Force. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7946>.
13. **Procedural Reasoning System User's Guide. A Manual for Version 2.0,** SRI International, 2001. URL: <http://www.ai.sri.com/~prs/prs-manual.pdf>.
14. **Борейко А.А., Инзарцев А.В., Машошин А.И., Павин А.М., Пашкевич И.В.** Система управления АНПА большой автономности на базе мультиагентного подхода // Подводные исследования и робототехника. 2019. №2 (28). С. 23–31.
15. **Пшихопов В.Х., Сиротенко М.Ю.** Структурно-алгоритмическая реализация системы управления автономным мобильным роботом с нейросетевым планировщиком перемещений // Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Интеллектуальные САПР». 2004. № 3 (38). С. 185–190.
16. **Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А.** Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука, 2005.
17. **Пшихопов В.Х., Сиротенко М.Ю., Гуренко Б.В.** Структурная организация систем автоматического управления подводными аппаратами для априори неформализованных сред // Информационно-измерительные и управляющие системы. Интеллектуальные и адаптивные роботы. 2006. Т.4. № 1–3. С. 73–79.
18. **Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В.** О некоторых задачах динамики и управления пространственным движением АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 13–26.
19. **Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Сидоренко А.В., Хмельков Д.Б.** Архитектурные конфигурации систем управления АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 1. С. 18–30.
20. **Пшихопов В.Х.** Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. Таганрог: Изд-во ТРТИ ЮФУ, 2009. 183 с.
21. **Ермолов И.Л.** Расширение функциональных возможностей мобильных технологических роботов путем повышения уровня их автономности с использованием иерархической комплексной обработки бортовых данных. Дис. ... докт. техн. Наук. 2012. 350 с.
22. **Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И.** Интегрированная система управления автономного необитаемого подводного аппарата // Материалы 7-ой Российской конференции по проблемам управления. Санкт-Петербург, 2014. С. 855–858.
23. **Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И.** Система управления – наиболее сложная часть автономных необитаемых подводных аппаратов // Морская радиоэлектроника. 2015. №4 (54). С. 23–32.
24. **Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И.** Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1. С. 50–58.
25. **Rajan, K., et al.** Remote agent: an autonomous control system for the new millennium, *Proc. of prestigious applications of intelligent systems, European conference on artificial intelligence (ECAI)*, Berlin, 2000.
26. **Innocenti, B.,** A multi-agent architecture with distributed coordination for an autonomous robot. Ph.D. dissertation, Universitat de Girona, 2009.
27. **Kim, T.W., Yuh, J.,** Development of a real-time control architecture for a semiautonomous underwater vehicle for intervention missions, Autonomous Systems Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Hawaii, 2003, pp. 1521–1530.

28. Sutarto H., Budiyo A. Development of linear parameter varying control system for autonomous underwater vehicle, *Indian J. Geo-Marine Sci.*, 2011, vol. 40, pp. 275–286.
29. Sarhadi, P., Noei, A.R., Khosravi, A., Model reference adaptive autopilot with anti-windup compensator for an autonomous underwater vehicle: Design and hardware in the loop implementation results, *Appl. Ocean Res.*, 2017, vol. 62, pp. 27–36.
30. Geranmehr, B., Nekoo, S.R., Nonlinear suboptimal control of fully coupled non-affine six-DOF autonomous underwater vehicle using the state-dependent Riccati equation, *Ocean Eng.*, 2015, vol. 96, pp. 248–257.
31. Fischer, N., Hughes, D., et al., Nonlinear RISE-Based Control of an Autonomous Underwater Vehicle, *IEEE Trans. Robot.*, 2014, vol. 30, pp. 845–852.
32. Narasimhan, M., Singh, S.N., Adaptive optimal control of an autonomous underwater vehicle in the dive plane using dorsal fins, *Ocean Eng.*, 2006, vol. 33, pp. 404–416.
33. Zhu, D., Sun, B., The bio-inspired model based hybrid sliding-mode tracking control for unmanned underwater vehicles, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 2013, vol. 26, pp. 2260–2269.
34. Raeesy, B., Safavi, A.A., Khayatian, A.R., Optimized fuzzy control design of an autonomous underwater vehicle, *Iran. J. Fuzzy Syst.*, 2012, vol. 9, pp. 25–41.
35. Esfahani, H.N., Azimirad, V., Danesh, M., A Time Delay Controller included terminal sliding mode and fuzzy gain tuning for Underwater Vehicle-Manipulator Systems, *Ocean Eng.*, 2015, vol. 107, pp. 97–107.
36. Parhi, D.R., Kundu, S., Review on guidance, control and navigation of autonomous underwater mobile robot, *Int. J. Artif. Intell. Comput. Res.*, 2012, vol. 4, pp. 21–31.
37. Dayan, P., Berridge, K.C., Model-based and model-free pavlovian reward learning: reevaluation, revision and revelation, *Cogn Affect Behav Neurosci.*, 2014, vol. 14, pp. 473–492.
38. El-Fakdi, A., Carreras, M., Two-step gradient-based reinforcement learning for underwater robotics behavior learning, *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, vol. 61, no.3, pp. 271–282.
39. Zhang, L., Jiang, D., Zhao, J., Shan, M., An AUV for ocean exploring and its motion control system architecture, *Open Mechanical Engineering Journal*, 2013, vol.7, pp. 40–47.
40. Hasankashefi, M., Bolouri, F., Bolouri, K., Path Planning and Open-Loop Control Algorithms for a Differential Thrust Autonomous Underwater Vehicle, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, 2016, vol. 11, issue 4, pp. 151–158.
41. Pinto, J., Borges de Sousa, J., Py, F., Rajan, K., Experiments with deliberative planning on autonomous underwater vehicles, *IROS Workshop on Robotics for Environmental Monitoring*, Vila Moura, Portugal, 2012.
42. Pettillot, Y.R., Antonelli, G., Casalino, G., Ferreira, F., Underwater Robots: From Remotely Operated Vehicles to Intervention-Autonomous Underwater Vehicles, *IEEE Robot. Autom. Mag.*, 2019, vol. 26, pp. 94–101.
43. Melo, J., Matos, A., Survey on advances on terrain based navigation for autonomous underwater vehicles, *Ocean Eng.*, 2017, vol. 139, pp. 250–264.
44. Galarza, C., Masmitja, I., Prat, J., Gomariz, S., Design of obstacle detection and avoidance system for Guanay II AUV, *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, pp. 32–37.
45. Lin, C., Wang, H., Yuan, J., Yu, D., Li, C., An improved recurrent neural network for unmanned underwater vehicle online obstacle avoidance, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2019, vol. 44, pp. 120–133.
46. Sarda, E.I., Dhanak, M.R., Launch and Recovery of an Autonomous Underwater Vehicle from a Station-Keeping Unmanned Surface Vehicle, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2019, vol. 44, pp. 290–299.
47. Zhang, T., Wang, Z., Li, Y., Tong, J., A passive acoustic positioning algorithm based on virtual long baseline matrix window, *J. Navig.*, 2019, vol. 72, pp. 193–206.
48. Wei, E., Dong, C., Yang, Y., Tang, S., Liu, J., Gong, G., Deng, Z., A Robust Solution of Integrated SITAN with TERCOM Algorithm: Weight-Reducing Iteration Technique for Underwater Vehicles' Gravity-Aided Inertial Navigation System, *Navig. J. Inst. Navig.*, 2017, vol. 64, pp. 111–122.
49. Salavasisdis, G., Munafò, A., et al., Terrain-aided navigation for long-endurance and deep-rated autonomous underwater vehicles, *J. Field Robot.*, 2019, vol. 36, pp. 447–474.
50. Eren, F., Pe'Eri, S., et al., Position, orientation and velocity detection of Unmanned Underwater Vehicles using an optical detector array, *Sensors*, 2017, vol. 17, p. 1741.
51. Zhong, L., Li, D., et al., A fast binocular localization method for AUV docking, *Sensors*, 2019, vol. 19, p. 1735.
52. Liu, S., Xu, H., Lin, Y., Gao, L., Visual navigation for recovering an AUV by another AUV in shallow water, *Sensors*, 2019, vol. 19, p. 1889.

53. Monroy-Anieva, J.A., Rouviere, C., et al., Modeling and control of a micro AUV: Objects follower approach, *Sensors*, 2018, vol. 18, p. 2574.
54. Wang, R., Wang, X., Zhu, M., Lin, Y., Application of a Real-Time Visualization Method of AUVs in Underwater Visual Localization, *Appl. Sci.*, 2019, vol. 9, p. 1428.
55. Manzanilla, A., Reyes, S., et al., Autonomous navigation for unmanned underwater vehicles: Real-time experiments using computer vision, *IEEE Robot.*, 2019, vol. 4, pp. 1351–1356.
56. Yan, Z., Wang, L., et al., Polar cooperative navigation algorithm for multi-unmanned underwater vehicles considering communication delays, *Sensors*, 2018, vol. 18, p. 1044.
57. Cui, J., Zhao, L., Ma, Y., Yu, J., Adaptive consensus tracking control for multiple autonomous underwater vehicles with uncertain parameters, *ICIC Express Lett.*, 2019, vol. 13, pp. 191–200.
58. Baylog, J.G., Wettergren, T.A., A ROC-Based approach for developing optimal strategies in UUV search planning, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2018, vol. 43, pp. 843–855.
59. Li, J., Zhang, J., Zhang, G., Zhang, B., An adaptive prediction target search algorithm for multi-AUVs in an unknown 3D environment, *Sensors*, 2018, vol. 18, p. 3853.
60. Bing Sun, D.Z., Complete Coverage Autonomous Underwater Vehicles Path Planning Based on Glasius Bio-Inspired Neural Network Algorithm for Discrete and Centralized Programming, *IEEE Trans. Cogn. Dev. Syst.*, 2019, pp. 73–84.
61. Yan, Z., Liu, X., Zhou, J., Wu, D., Coordinated Target Tracking Strategy for Multiple Unmanned Underwater Vehicles with Time Delays, *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 10348–10357.
62. Simetti, E., Wanderlingh, F., et al., Autonomous Underwater Intervention: Experimental Results of the MARIS Project, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2018, vol. 43, pp. 620–639.
63. Cataldi, E., Chiaverini, S., Antonelli, G., Cooperative Object Transportation by Two Underwater Vehicle-Manipulator Systems, *Proc. 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Zadar, Croatia. 19–22 June 2018, pp.161–166.
64. García-Valdovinos, L.G., Fonseca-Navarro, F., et al., Neuro-Sliding Control for Underwater ROV's Subject to Unknown Disturbances, *Sensors*, 2019, vol. 19, p. 2943.
65. Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В. Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. 1998. №2. С.64–116.
66. Ржевский Г.А., Скобелев П.О. Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. Самара: Офорт, 2015. 290 с.

Bykova, V.S., Martynova, L.A., Mashoshin, A.I., and Pashkevich, I.V. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia)

A Dispatcher for a Multi-Agent Control System of an Autonomous Underwater Vehicle: Structure, Algorithms, and Simulation Results, *Girokopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 3 (110), pp. 109–121.

Abstract. Algorithms for a dispatcher of a multi-agent control system for an autonomous underwater vehicle (AUV) are described. The algorithms are designed on a modular basis, which provides for the control of a wide range of tasks assigned to the AUV, and, in addition, makes the implementation of each algorithm simple.

Key words: autonomous underwater vehicle (AUV), control system, dispatcher of control system, control algorithms.

Материал поступил 25.06.2020