

А. И. Машошин, д-р техн. наук, проф., aimashoshin@mail.ru,

И. В. Пашкевич, глав. специалист, iv@bk.ru,

АО "Концерн "ЦНИИ "Электрон", г. Санкт-Петербург

Проблемные вопросы интеллектуализации процессов управления автономными необитаемыми подводными аппаратами¹

Рассмотрены пути интеллектуализации процессов управления автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА) на примере решения трех задач, от которых во многом зависит успешное применение АНПА.

Первой задачей является создание системы управления (СУ) АНПА, обеспечивающей достижение цели миссии в условиях возникновения нештатных ситуаций, обусловленных как внешними, так и внутренними причинами, а также преднамеренного и непреднамеренного противодействия. Показано, что для построения СУ АНПА в наибольшей степени подходит децентрализованная мультиагентная структура, в которой каждая система АНПА является самостоятельным независимым интеллектуальным агентом с собственной системой управления. СУ должна быть оснащена набором адаптивных алгоритмов, обеспечивающих: управление АНПА в условиях возникновения нештатных ситуаций с учетом ограничений по запасу электроэнергии, скорости хода, точности автономной подводной навигации, дальности гидроакустической связи; рациональное распределение энергоресурсов по системам АНПА в соответствии со сложившейся обстановкой; сохранение функциональной устойчивости АНПА при частичной неисправности технических средств.

Второй задачей является создание системы подводной навигации, обеспечивающей выполнение миссий АНПА на больших удалениях от пункта базирования. Поскольку навигация АНПА с использованием только бортовых средств (инерциальной навигационной системы и лага) не обеспечивает необходимой точности, необходимым условием плавания АНПА на большие расстояния является выполнение обсервации с использованием внешних источников, выбор которых в сложившихся условиях представляет собой нетривиальную задачу.

Третьей задачей является создание системы сетевой подводной связи (СПС), обеспечивающей групповое применение АНПА. Наземным аналогом СПС является сетевая радиосвязь. Но если последняя достаточно хорошо развита, то первая только делает начальные шаги. Обусловлено это как более поздней практической востребованностью СПС, так и множеством фундаментальных физических факторов, затрудняющих развитие СПС, к которым относятся: существенно ограниченная полоса частот, которая может использоваться на практике для передачи сигнала; большое время распространения гидроакустического сигнала по сравнению с радиосигналом; образование протяженных зон тени и замирания связного сигнала вследствие его многолучевого распространения; значительные доплеровские искажения; быстрая изменчивость характеристик гидроакустической среды.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, система управления, подводная навигация, сетевая подводная связь

Введение

Необитаемые подводные аппараты (НПА) являются одним из наиболее перспективных средств изучения и освоения Мирового океана [1–8]. Их созданием занимаются более сотни компаний в десятках стран мира. Вместе с тем можно констатировать, что на сегодняшний день реальный прогресс достигнут при использовании только телеуправляемых НПА. Автономные же НПА (АНПА) полноценно решать возлагаемые на них задачи пока не в состоя-

нии. И объясняется это недостаточным уровнем их интеллектуализации, т.е. внедрения в их системы управления современных технологий искусственного интеллекта.

Целью работы является рассмотрение путей интеллектуализации процессов управления АНПА на примере решения трех задач, от которых во многом зависит эффективное применение АНПА, а именно:

1) управление АНПА, обеспечивающее достижение цели миссии в условиях возникновения нештатных ситуаций, а также преднамеренного и непреднамеренного противодействия;

2) подводная навигация АНПА большой автономности, обеспечивающая выполнение

¹Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00253).

миссии на больших удалениях от пункта базирования;

3) сетевая подводная связь, обеспечивающая групповое применение АНПА.

Интеллектуализация решения перечисленных задач предполагает использование такой технологии искусственного интеллекта, как интеллектуальная поддержка принятия управленческих решений [9].

По каждой задаче в работе формулируются основные проблемные вопросы и намечаются пути их решения.

Управление АНПА

Управление АНПА реализуется ее системой управления (СУ), назначением которой является максимально точное выполнение маршрутного задания (МЗ), загруженного в ее память до начала миссии. МЗ представляет собой разработанный человеком-оператором набор формализованных инструкций, привязанных ко времени и географическим координатам, точное и своевременное выполнение которых позволит достичь цели миссии [10]. Для разработки МЗ созданы специальные языки и инструментарий [11].

Выполнение МЗ АНПА под управлением СУ больших трудностей не вызывало бы, если бы не препятствующие обстоятельства. Опыт применения АНПА показывает, что эти обстоятельства сопутствуют практически каждой миссии, и обусловлены они как внешними, так и внутренними факторами. К внешним факторам относятся:

- появление подводных объектов, столкновение с которыми нужно избежать;
- обнаружение неподвижных препятствий (подводных хребтов и др.), не нанесенных на навигационную карту, которые нужно обойти;
- непредвиденное изменение скорости и/или направления течения, вызывающее необходимость изменять параметры движения АНПА;
- изменение границ ледового покрова, что препятствует всплытию для обсервации в назначенное время.

Большинство из перечисленных факторов приводит к дополнительным временным затратам и дополнительному расходу запаса электроэнергии и, в конечном счете, к необходимости корректировки МЗ.

Ситуация еще более усложняется в условиях преднамеренного противодействия выполнению миссии, что имеет место при применении АНПА в специальных операциях.

Внутренними факторами, препятствующими выполнению МЗ, являются неустраняемые неисправности аппаратной части АНПА и не восстанавливаемые сбои программного обеспечения, что также приводит к необходимости корректировки МЗ, а в ряде случаев и к прекращению миссии.

Парирование перечисленных негативных факторов является нетривиальной задачей даже для человека, поскольку для принятия в сложившейся ситуации эффективного решения, обеспечивающего достижение цели миссии, нужно учесть как возникшие негативные факторы, так и ограничения по запасу электроэнергии, скорости хода, точности автономной навигации, дальности гидроакустической связи. Для решения этой задачи системой управления АНПА она должна реализовывать сложные адаптивные алгоритмы, базирующиеся на технологиях 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 [12]. Такие алгоритмы во многом являются эвристическими, что переносит трудности с их разработки на их практическую отработку. А длительная отработка не предусмотрена действующей в России нормативной базой, регламентирующей разработку по госконтрактам сложной техники.

СУ АНПА относится к системам управления наивысшей сложности, что обусловлено необходимостью управлять в реальном времени большим числом разнородных технических средств и при этом функционировать в полностью автоматическом режиме в непрерывно изменяющейся внешней нередко агрессивной среде при ограниченных возможностях автономной подводной навигации и связи с пунктом управления.

Известно [13, 14], что построить такую СУ как централизованную (мультиобъектную), в которой СУ управляет всеми действиями всех технических средств АНПА, ввиду высокой сложности весьма затруднительно.

Для построения СУ АНПА в наибольшей степени подходит децентрализованная мультиагентная структура (рис. 1).

При такой структуре каждая система АНПА является самостоятельным независимым интеллектуальным агентом с собственной системой управления. Управление движением АНПА и выполнением других функций осуществляется путем взаимодействия на основе равноправ-



Рис. 1. Структурная схема СУ АНПА
Fig. 1. Structural diagram of AUV control system

ного общения всех систем-агентов. Для того чтобы это взаимодействие имело целенаправленный характер, предусмотрен специальный агент-диспетчер, организующий выполнение сценария миссии, описанного в МЗ [10].

С учетом сказанного основными путями решения проблемы создания эффективной СУ АНПА являются:

- разработка адаптивных алгоритмов, позволяющих управлять системами АНПА и АНПА в целом в условиях возникновения нештатных ситуаций, а также преднамеренного и непреднамеренного противодействия с учетом ограничений по запасу электроэнергии, скорости хода, точности автономной подводной навигации, дальности гидроакустической связи;
- разработка рациональных алгоритмов распределения энергоресурсов по системам АНПА в соответствии со сложившейся обстановкой;
- разработка алгоритмов сохранения функциональной устойчивости АНПА при частичной неисправности технических средств;
- создание моделирующих комплексов, позволяющих отрабатывать СУ, в том числе в нештатных ситуациях, а также верифицировать маршрутное задание АНПА перед загрузкой его в СУ;
- совершенствование нормативной базы, с тем чтобы в необходимых случаях предусматривать длительный этап натурной отработки создаваемых робототехнических средств.

Подводная навигация АНПА большой автономности

Одной из важных миссий, которые планируется возложить на АНПА, является выполнение задач в труднодоступных районах (в частности подо льдом) на больших удалениях от базы. Для выполнения этих миссий уже сейчас создаются АНПА большой автономности (АНПА БА). Одним из необходимых условий эффективного решения задач на больших удалениях от базы является высокоточная навигация АНПА БА на всем протяжении маршрута.

Основой навигации АНПА БА остается счисление пути с использованием данных бортового курсоуказателя либо бесплатформенной инерциальной навигационной системы и абсолютного (гидроакустического) либо относительного (электромагнитного) лага [15, 16]. Однако,

учитывая жесткие требования к габаритным размерам и энергопотреблению этих приборов для их размещения на АНПА, они имеют ограниченные характеристики как по точности выработки курса, так и по глубине под килем, при которой возможно измерение скорости абсолютным лагом (как правило, не более 400 м). Из этого вытекает необходимость периодической коррекции координат АНПА путем осуществления обсервации.

На сегодняшний день разработано большое число методов определения координат (позиционирования) АНПА [15–23]. Все эти методы можно разделить на две группы:

- методы, не требующие предварительного навигационного оборудования планируемого маршрута АНПА;
- методы, предусматривающие предварительное навигационное оборудование планируемого маршрута АНПА.

Рассмотрим каждую группу методов.

Методы позиционирования АНПА, не требующие предварительного навигационного оборудования их планируемого маршрута

К этим методам относятся:

1. Позиционирование АНПА с использованием сигналов глобальных спутниковых навигационных систем (ГСНС) [15, 16]. Достоинствами данного метода являются высокая точность позиционирования (единицы—десят-

ки метров) и возможность его использования в любой точке Мирового океана, а недостатком — необходимость всплытия АНПА в надводное положение и приема сигналов ГСНС, что занимает значительное время (особенно при всплытии с больших глубин), требует дополнительного расхода запаса электроэнергии, а также ведет к потере скрытности АНПА. Кроме того, возможность позиционирования АНПА по данным ГСНС зависит от состояния поверхности моря (при большом волнении прием сигналов ГСНС существенно затруднен). Также ввиду малой мощности излучения сигналы ГСНС обладают низкой помехозащищенностью и легко поддаются подавлению либо преднамеренному искажению.

2. Позиционирование с использованием сигналов радионавигационных систем (РНС) [17–19]. В зависимости от диапазона используемых частот РНС делятся на сверхдлинноволновые (СДВ), длинноволновые (ДВ), средневолновые (СВ). Достоинством РНС СДВ диапазона является большая дальность действия (до 13 000 км), а недостатком — низкая точность позиционирования (до 7600 м на предельной дальности). Достоинством РНС ДВ диапазона является сравнительно большая дальность действия (до 1500 км) и приемлемая точность позиционирования (до 150 м на предельной дальности). Достоинством РНС СВ диапазона является сравнительно большая дальность действия (до 1000 км) и высокая точность позиционирования (единицы метров).

К достоинствам РНС следует также отнести возможность позиционирования при определенных условиях при нахождении АНПА в приповерхностном слое воды без всплытия на поверхность, а также подо льдом.

Основным недостатком РНС, кроме необходимости всплытия АНПА в приповерхностный слой воды, является тот факт, что отечественными системами РНС охвачены весьма ограниченные области Мирового океана, включая и прибрежные моря России.

3. Позиционирование с использованием технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии [20–22]. Метод состоит (рис. 2) в установке у побережья нескольких ненаправленных гидроакустических излучателей, периодически излучающих сложные сигналы, содержащие информацию об условном номере излучателя, времени излучения и скорости распространения сигнала. АНПА, приняв сигнал каждого излучателя, с использованием извлеченной из него информации и зная координаты каждого излучателя, вычисляет время его распространения и дистанцию до излучателя.

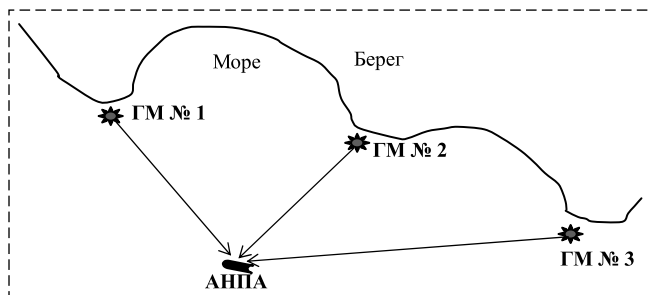


Рис.2. Иллюстрация позиционирования АНПА с использованием технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии

Fig. 2. Illustration of AUV positioning using high-precision underwater acoustic ranging technology

И далее, определив дистанцию до нескольких излучателей, методом длинной базы вычисляет собственные координаты. Ошибка позиционирования согласно работе [20] не превышает 250 м при удалении от излучателей до нескольких сотен километров.

Достоинством данного метода является возможность скрытного (без всплытия на поверхность) позиционирования всех подводных объектов (в том числе и АНПА), находящихся в районе площадью до 100 тыс. км², причем не периодически, а практически непрерывно, что позволяет АНПА не отклоняться от заложенного маршрута. Недостатком метода является необходимость развертывания подобных систем в районах, через которые пролегает маршрут АНПА, а также необходимость периодически уточнять скорость распространения акустических сигналов на трассе от каждого излучателя до АНПА.

На сегодняшний день подобных развернутых систем в мире нет, но их разработка активно ведется как в России [20], так и за рубежом [21].

Методы позиционирования АНПА, предусматривающие предварительное навигационное обустройство планируемого маршрута АНПА

К этим методам относятся:

1. Позиционирование с использованием донных маяков-ответчиков (ДМО), излучающих кодированные сигналы по запросу либо периодически [15,16]. По этим сигналам АНПА определяет текущую дистанцию до каждого ДМО и далее одним из методов вычисляет собственные координаты относительно ДМО. Точность позиционирования АНПА в зависимости от числа используемых ДМО (от одного и более) составляет единицы—десятки метров.

Достоинством данного метода является возможность осуществления позиционирования

без изменения глубины хода АНПА, а к недостаткам можно отнести:

- необходимость предварительной установки ДМО вдоль маршрута АНПА, что является весьма затратной процедурой;
- ограничения по глубине моря в месте установки ДМО;
- ограничения по времени функционирования ДМО.

2. Позиционирование с использованием естественных геофизических полей (батиметрического, гравитационного и магнитного) [22]. Данный метод состоит в измерении текущих значений пространственных аномалий этих полей и их сопоставлении с помощью экстремально-корреляционных методов с предварительно измеренными аномалиями, привязанными к географическим координатам. Точность позиционирования данным методом составляет сотни метров—единицы километров.

Достоинством данного метода является возможность скрытного позиционирования АНПА, а недостатками — необходимость наличия:

- существенных аномалий используемых естественных геофизических полей в районе плавания;
- заранее составленных подробных карт этих аномалий;
- аппаратуры, позволяющей фиксировать аномалии с необходимой точностью.

3. Позиционирование с использованием искусственных навигационных полей [16]. Данный метод идеологически аналогичен методу позиционирования с использованием ДМО, за исключением того, что вместо активных гидроакустических маяков используются расставленные в известных точках вдоль маршрута движения АНПА донные пассивные подводные ориентиры (ППО). В качестве ППО могут также использоваться донные объекты значительных габаритных размеров (затонувшие корабли, самолеты, подводные скалы и т.п.). К ППО предъявляется основное требование — возможность их надежного обнаружения и распознавания гидролокатором АНПА. Точность позиционирования с использованием ППО составляет десятки—сотни метров.

Достоинством метода позиционирования с использованием искусственных навигационных полей является возможность позиционирования АНПА без всплытия на поверхность, а недостатками — необходимость предварительного оборудования маршрута и ограничения по глубине моря. При этом следует заметить, что на сегодняшний день идея данного метода не доведена до практической реализации.

4. Позиционирование АНПА с использованием радиогидроакустических буйев, называемых в зарубежной литературе GPS Intelligent Buoys или сокращенно GIBs [23]. Каждый буй по радиоканалу принимает сигналы СНС и транслирует их по гидроакустическому каналу. АНПА принимает эти сигналы и одновременно путем модемного обмена определяет расстояние до буя и его пеленг. Достоинствами данного метода является возможность высокоточного позиционирования АНПА без всплытия на поверхность, а недостатком — необходимость установки буйев вдоль маршрута АНПА. При этом, учитывая ограниченный заряд аккумулятора, буи приходится расставлять в процессе движения АНПА по маршруту.

Вариантом данного метода является оборудование подобным буюм АНПА. Тогда вместо всплытия АНПА всплывать на поверхность для получения сигналов ГСНС будет привязанной буй. В ряде случаев этот вариант может оказаться предпочтительным.

Из рассмотрения методов позиционирования АНПА можно сделать вывод, что применение каждого из них зависит от многих факторов, ввиду чего необходима разработка и внедрение в СУ АНПА адаптивных алгоритмов выбора метода обсервации в сложившихся условиях с учетом многообразия факторов.

Сетевая подводная связь

Известно, что применение АНПА наиболее эффективно при их групповом использовании [6—8]. Необходимым условием группового применения АНПА является их оборудование средствами сетевой подводной (гидроакустической) связи (СПС). Специфическими техническими требованиями к СПС (и одновременно проблемными вопросами ее реализации) являются [24—36]:

- обеспечение обмена данными одновременно между заранее непредсказуемым числом абонентов сети;
- высокоточное абсолютное либо относительное позиционирование абонентов в процессе обмена данными;
- обеспечение постоянной связности сети в сложных гидроакустических условиях путем создания оптимальных на текущий момент маршрутов передачи данных между каждой парой абонентов;
- ограничение массогабаритных характеристик и стоимости сетевого оборудования.

Наземным аналогом СПС является сетевая радиосвязь. Но если последняя достаточно хорошо развита, то первая только делает начальные шаги. Обусловлено это как более поздней практической востребованностью СПС, так и множеством фундаментальных физических факторов, затрудняющих развитие СПС. К этим факторам относятся: существенно ограниченная полоса частот, которая может использоваться на практике для передачи сигнала; большое время распространения гидроакустического сигнала по сравнению с радиосигналом; реверберация связанного сигнала большой интенсивности и длительности; образование протяженных зон тени и замирания связанного сигнала вследствие его многолучевого распространения; большие доплеровские искажения; быстрая изменчивость характеристик гидроакустической среды.

Для преодоления негативного влияния перечисленных факторов применительно к СПС разработаны методы и алгоритмы [24–36]:

- формирования и обработки связанного сигнала, обеспечивающие высокую помехоустойчивость передачи данных;
- управления доступом к среде с учетом специфики распространения гидроакустического сигнала;
- сетевой маршрутизации данных с учетом многолучевости и временной изменчивости среды распространения;
- транспорта данных в условиях длительных задержек в их доставке и разрывов связности сети.

Но проблема состоит в том, что эффективность применения всех без исключения разработанных методов зависит от текущих гидроакустических условий, конфигурации сети и ряда других факторов. Ввиду этого для эффективной реализации СПС СУ АНПА должна быть оснащена адаптивными алгоритмами выбора методов реализации СПС в сложившихся условиях. Разработка таких адаптивных алгоритмов, к тому же реализуемых без участия человека, представляет собой весьма нетривиальную задачу, поскольку, с одной стороны, они требуют учета большого числа факторов, а с другой стороны, они представляют собой решение многокритериальной задачи.

Заключение

Эффективное применение АНПА для исследования и освоения Мирового океана существенно зависит от способности их СУ при-

нимать верные решения в сложившейся обстановке, для чего система управления АНПА должна быть оснащена алгоритмами поддержки управленческих решений, базирующимися на технологиях искусственного интеллекта.

В работе рассмотрены пути интеллектуализации АНПА в обеспечение решения трех задач, от решения которых во многом зависит успешное применение АНПА. Этими задачами являются:

- 1) управление АНПА, обеспечивающее достижение цели миссии в условиях возникновения нештатных ситуаций, а также преднамеренного и непреднамеренного противодействия;
- 2) подводная навигация, обеспечивающая выполнение миссии на больших удалениях от пункта базирования;
- 3) сетевая подводная связь, обеспечивающая групповое применение АНПА.

Авторы благодарят И. Г. Архипову и В. Н. Полиенко за ценные советы в части методов радионавигации.

Список литературы

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, N. 4. P. 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. Белоусов 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. Указ Президента РФ № 490 от 10.10.2019 г.
10. Борейко А. А., Инзарцев А. В., Мамошин 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.
11. 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>.
12. 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>.
13. Городецкий В. И., Грушинский М. С., Хабалов А. В. Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 64–116.

14. **Ржевский Г. А., Скобелев П. О.** Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. Самара: Офорт, 2015. 290 с.
15. **Kinsey J. C., Eustice R. M., Whitcomb L. L.** A Survey of Underwater Vehicle Navigation: Recent Advances and new Challenges // IFAC Conference on maneuvering and control of marine craft. 2006. Lisbon, Portugal.
16. **Кебкал К. Г., Машошин А. И.** Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24, № 3 (94). С. 115—130.
17. **Малеев П. И.** Проблемы средств навигации АНПА и возможные пути их решения // Навигация и гидрография. 2015. № 39. С. 7—11.
18. **Каретников В. В., Миляков Д. Ф., Брянова Я. Д.** Навигационное обеспечение Северного морского пути: функциональные дополнения ГНСС // Морская радиоэлектроника. 2018. № 2 (64). С. 8—11.
19. **Каретников В. В., Миляков Д. Ф., Брянова Я. Д., Сикарев А. А.** Навигационное обеспечение Северного морского пути: проблемы и перспективы развития // Морская радиоэлектроника. 2017. № 4 (62). С. 18—22.
20. **Моргунов Ю. Н., Безответных В. В., Буренин А. В., Войтенко Е. А., Голов А. А.** Экспериментальное тестирование технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии // Акустический журнал. 2018. Т. 64, № 2. С. 191—196.
21. **DARPA** Broad Agency Announcement Positioning System for Deep Ocean Navigation (POSYDON). Strategic Technology Office, DARPA-BAA-15-30.
22. **Степанов О. А., Торопов А. Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям // Гироскопия и навигация. 2015. № 3. С. 102—125; 2015. № 4. С. 147—159.
23. **Desset S., Damus R., Morash J., Bechaz C.** Use of GLBs in AUVs for underwater archaeology // Sea Technology. 2003. Vol. 44, N. 12. P. 22—27.
24. **Кебкал К. Г., Машошин А. И., Мороз Н. В.** Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. № 2 (105). С. 106—135.
25. **Domingo M. C.** An overview of the internet of underwater things // Journal of Network and Computer Applications. 2012. Vol. 35, N. 6. P. 1879—1890.
26. **Heidemann J., Stojanovic M., Zorzi M.** Underwater sensor networks: Applications, advances, and challenges // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2012. Vol. 370, N. 1958. P. 158—175.
27. **Akyildiz I. F., Pompili D., Melodia T.** Underwater acoustic sensor networks: research challenges // Ad Hoc Networks. 2005. Vol. 3, N. 3. P. 257—279.
28. **Lmai S., Chitre M., Laot C., Houcke S.** Throughput-efficient super-TDMA MAC transmission schedules in ad hoc linear underwater acoustic networks // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2017. Vol. 42. P. 156—174.
29. **Lmai S., Chitre M., Laot C., Houcke S.** Throughput-Maximizing Transmission Schedules for Underwater Acoustic Multihop Grid Networks // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2015. Vol. 40. P. 853—863.
30. **Diamant R., Lampe L.** Spatial Reuse Time-Division Multiple Access for Broadcast Ad Hoc Underwater Acoustic Communication Networks // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2011. Vol. 36, N. 2. P. 172—185.
31. **Kredo K., Djukic P., Mohapatra P.** STUMP: Exploiting Position Diversity in the Staggered TDMA Underwater MAC Protocol // Proc. of IEEE INFOCOM. 2009.
32. **Chirdchoo N., Soh W. S., Chua K. C.** MU-Sync: A time synchronization protocol for underwater mobile networks // Proc. of the ACM International Workshop on Underwater Networks. 2008.
33. **Knappe S.** et al. A microfabricated atomic clock // Applied Physics Letters. 2004. Vol. 85, N. 9. P. 1460—1462.
34. **Gardner T., Collins J. A.** Advancements in high-performance timing for long term underwater experiments: A comparison of chip scale atomic clocks to traditional microprocessor-compensated crystal oscillators // Proc. IEEE Oceans Conf. 2011.
35. **Кебкал К. Г.** et al. Underwater acoustic modems with integrated atomic clocks for one-way travel-time underwater vehicle positioning // Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE). 2017.

Problematic Issues of Intellectualizing the Control System of Autonomous Underwater Vehicles

A. I. Mashoshin, aimashoshin@mail.ru, **I. V. Pashkevich**, iv@bk.ru,

JSC "Concern" Central Research Institute "Elektropribor", St. Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Mashoshin A. I., D. Tech. Sc., Chief of research center, JSC "Concern" Central Research Institute "Elektropribor", St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: aimashoshin@mail.ru

Accepted on July 07, 2020

Abstract

The paper considers ways of intellectualizing the control processes of autonomous underwater vehicles (AUVs) by the example of solving three problems, on which the successful use of AUVs largely depends. The first problem is to create an AUV control system (CS), which ensures the achievement of the mission's objective in the event of emergencies caused by both external and internal reasons, as well as deliberate and unintentional counteraction. It is shown that for the construction of the AUV's CS the decentralized multi-agent structure is most suitable, in which each AUV system is an independent intellectual agent with its own control system. The control system must be equipped with a set of adaptive algorithms that ensure: control of AUV in the event of emergency situations, taking into account restrictions on the supply of electric energy, speed, accuracy of autonomous underwater navigation, range of hydro-acoustic communication; rational distribution of energy resources by AUV systems in accordance with the current situation; maintaining the functional stability of the AUV with a partial malfunction of technical means. The second problem is to create an underwater navigation system that ensures the accomplishment of AUV missions at great distances from the base point. Since AUV navigation using only on-board means (inertial navigation system and lag) does not provide the necessary accuracy, a prerequisite for AUV navigation over long distances is to conduct an observation using external sources, the choice of which in the circumstances is a non-trivial task. The third problem is to create a network underwater commu-

nication system (NUCS), which provides for the group application of AUVs. The ground analogue of NUCS is network radio communication. But if the latter is fairly well developed, then the former only takes the initial steps. This is due to both the later practical relevance of NUCS, and many fundamental physical factors that impede the development of NUCS, which include: a substantially limited frequency band that can be used in practice for signal transmission; a large propagation time of the hydroacoustic signal compared to the radio signal; the formation of extended shadow zones and fading of the connected signal due to its multipath propagation; significant Doppler distortions, fast variability of the characteristics of the hydroacoustic medium.

Keywords: autonomous underwater vehicle, control system, underwater navigation, network underwater communication

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 19-08-00253).

For citation:

Mashoshin A. I., Pashkevich I. V. Problematic Issues of Intellectualizing the Control System of Autonomous Underwater Vehicles, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 11, pp. 622–629.

DOI 10/17587/mau.21.622–629

References

1. Ageev M. D., et al. Autonomous underwater robots. Systems and technologies, Moscow, Nauka, 2005, 400 p. (in Russian).
2. Inzartsev A. V., et al. The use of an autonomous underwater vehicle for scientific research in the Arctic, *Underwater Research and Robotics*, 2007, no. 2 (4), pp. 5–14 (in Russian).
3. Bozhenov Yu. A. The use of autonomous underwater vehicles for the study of the Arctic and Antarctic, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 4–68 (in Russian).
4. Millar G., Mackay L. Maneuvering Under the Ice, *Sea Technology*, 2015, vol. 56, no. 4, pp. 35–38.
5. Gizitdinova M. R., Kuzmitsky M. A. Mobile underwater robots in modern oceanography and hydrophysics, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 4–13 (in Russian).
6. Illarionov G. Yu., Sidenko K. S., Bocharov L. Yu. A threat from the depths: XXI century, Khabarovsk, State Unitary Enterprise "Khabarovsk Regional Printing House", 2011, 304 p. (in Russian).
7. Belousov I. Modern and perspective autonomous underwater vehicles of the US Navy, *Foreign Military Review*, 2013, no. 5, pp. 79–88 (in Russian).
8. Kuzmitsky M. A., Gizitdinova M. R. Mobile underwater robots in solving the problems of the Navy: Modern technologies and prospects, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 37–48 (in Russian).
9. Decree of the President of the Russian Federation No. 490 of 10.10.2019 (in Russian).
10. Boreyko A. A. et al. AUV control system of great autonomy based on a multi-agent approach, *Underwater Research and Robotics*, 2019, no. 2(28), pp. 23–31 (in Russian).
11. Butler H., et al. The GeoJSON Format, RFC 7946. The Internet Engineering Task Force, available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc7946>.
12. Procedural Reasoning System User's Guide. A Manual for Version 2.0. SRI International, 2001, available at: <http://www.ai.sri.com/~prs/prs-manual.pdf>.
13. Gorodetsky V. I., Grushinsky M. S., Khabalov A. V. Multi-agent systems (review), *Artificial Intelligence News*, 1998, no. 2, pp. 64–116 (in Russian).
14. Rzhnevsky G. A., Skobelev P. O. How to manage complex systems? Multi-agent technologies for creating intelligent enterprise management systems, Samara, Ofort, 2015, 290 p. (in Russian).
15. Kinsey J. C., Eustice R. M., Whitcomb L. L. A Survey of Underwater Vehicle Navigation: Recent Advances and new Challenges, *IFAC Conference on maneuvering and control of marine craft*. 2006, Lisbon. Portugal.
16. Kebkal K. G., Mashoshin A. I. AUV acoustic positioning methods, *Gyroscopy and Navigation*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 80–89 (in Russian).
17. Maleev P. I. Problems of AUV navigation instruments and possible solutions, *Navigation and hydrography*, 2015, no. 39, pp. 7–11.
18. Karetnikov V. V., Milyakov D. F., Bryanova Y. D. Navigation support of the Northern Sea Route: GNSS functional additions, *Marine Radioelectronics*, 2018, no. 2 (64), pp. 8–11 (in Russian).
19. Karetnikov V. V. et al. Navigation support of the Northern Sea Route: problems and development prospects, *Marine Radioelectronics*, 2017, no. 4(62), pp. 18–22 (in Russian).
20. Morgunov Yu. N. et al. Experimental testing of high-precision underwater acoustic ranging technology, *Acoustic Journal*, 2018, vol. 64, no. 2, pp. 191–196 (in Russian).
21. DARPA Broad Agency Announcement Positioning System for Deep Ocean Navigation (POSYDON), Strategic Technology Office, DARPA-BAA-15-30.
22. Stepanov O. A., Toropov A. B. Nonlinear filtering methods in the task of navigating geophysical fields, *Gyroscopy and Navigation*, 2015, no. 3, pp. 102–125; 2015, no. 4, pp. 147–159 (in Russian).
23. Desset S., Damus R., Morash J., Bechaz C. Use of GIBs in AUVs for underwater archaeology, *Sea Technology*, 2003, vol. 44, no. 12, pp. 22–27.
24. Kebkal K. G., Mashoshin A. I., Morozs N. V. Solutions for Underwater Communication and Positioning Network Development, *Gyroscopy and Navigation*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 161–179 (in Russian).
25. Domingo M. C. An overview of the internet of underwater things, *Journal of Network and Computer Applications*, 2012, vol. 35, no. 6, pp. 1879–1890.
26. Heidemann J., Stojanovic M., Zorzi M. Underwater sensor networks: Applications, advances, and challenges, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, vol. 370, no. 1958, pp. 158–175.
27. Akyildiz I. F., Pompili D., Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges, *Ad Hoc Networks*, 2005, vol. 3, no. 3, pp. 257–279.
28. Lmai S., Chitre M., Laot C., Houcke S. Throughput-efficient super-TDMA MAC transmission schedules in ad hoc linear underwater acoustic networks, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, vol. 42, pp. 156–174.
29. Lmai S., Chitre M., Laot C., Houcke S. Throughput-Maximizing Transmission Schedules for Underwater Acoustic Multihop Grid Networks, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, vol. 40, pp. 853–863.
30. Diamant R., Lampe L. Spatial Reuse Time-Division Multiple Access for Broadcast Ad Hoc Underwater Acoustic Communication Networks, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011, vol. 36, no. 2, pp. 172–185.
31. Kreda K., Djukic P., Mohapatra P. STUMP: Exploiting Position Diversity in the Staggered TDMA Underwater MAC Protocol, *Proc. of IEEE INFOCOM*, 2009.
32. Chirdchoo N., Soh W. S., Chua K. C. MU-Sync: A time synchronization protocol for underwater mobile networks, *Proc. of the ACM International Workshop on Underwater Networks*, 2008.
33. Knappe S. et al. A microfabricated atomic clock, *Applied Physics Letters*, 2004, vol. 85, no. 9, pp. 1460–1462.
34. Gardner T., Collins J. A. Advancements in high-performance timing for long term underwater experiments: A comparison of chip scale atomic clocks to traditional microprocessor-compensated crystal oscillators, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2011.
35. Kebkal K. G. et al. Underwater acoustic modems with integrated atomic clocks for one-way travel-time underwater vehicle positioning, *Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE)*, 2017.