

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АНПА БОЛЬШОЙ АВТОНОМНОСТИ НА БАЗЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА

**А.А. Борейко<sup>1</sup>, А.В. Инзарцев<sup>1</sup>, А.И. Машошин<sup>2</sup>,  
А.М. Павин<sup>1</sup>, И.В. Пашкевич<sup>2</sup>**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем морских технологий ДВО РАН<sup>1</sup>  
АО «Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"»<sup>2</sup>

Представлена концепция построения системы управления (СУ) для АНПА большой автономности, учитывающая опыт ИПМТ ДВО РАН и АО «Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"» по созданию систем управления для АНПА тяжёлого класса, а также по проектированию и эксплуатации интегрированных систем управления и навигации. В основе СУ лежит децентрализованная мультиагентная структура, в которой каждый функциональный модуль АНПА является самостоятельным интеллектуальным агентом. Целенаправленный характер взаимодействию агентов придаёт агент-диспетчер, который организует выполнение сценария миссии АНПА. Сценарий миссии определяет маршрут движения АНПА, места и способы проведения различных океанологических измерений, а также позиционирований для уточнения координат. Для выполнения своих функций диспетчер, в свою очередь, имеет сложную мультиагентную структуру, включающую три уровня иерархии.

Обсуждаются особенности организации и функционирования агентов системы. Рассматривается сценарий взаимодействия агентов при выполнении типовой миссии и при решении задачи обеспечения навигационной безопасности АНПА.

## ВВЕДЕНИЕ

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются одним из наиболее перспективных средств изучения и освоения Мирового океана [1–7]. В последние годы в мире активно ведутся разработки АНПА сверхбольшого водоизмещения. Такие аппараты должны иметь большую автономность (несколько десятков суток) и океанскую дальность плавания. Увеличение водоизмещения АНПА позволяет расширить номенклатуру и объем собираемых данных, увеличить площадь обследуемых районов. Кроме того, эксплуатация таких АНПА во многих случаях предполагает береговое базирование – на выполнение миссий аппараты будут выходить из своих баз, а не разворачиваться в районах применения судами обеспечения. Это позволяет существенно снизить стоимость эксплуатации АНПА, особенно если дело касается использования этих роботов для многосуточного сбора океанографических данных под обширными ледовыми полями в высоких широтах.

При создании сверхбольших АНПА необходимо решить ряд сложных научно-технических проблем. Одной из них является разработка энергетических

систем, которые должны иметь большую энергоёмкость, относительно небольшие массогабаритные характеристики и не представлять угрозу для окружающей среды в случае аварийных ситуаций.

Однако гораздо более сложной проблемой является разработка эффективной и надёжной системы управления (СУ), способной в автоматическом режиме обеспечить выполнение поставленного задания (миссии). Такая СУ должна адаптироваться к складывающейся ситуации, на которую оказывают влияние как внешние причины (разного рода препятствия и возможное противодействие), так и внутренние (неисправности бортового оборудования). Длительное подводное плавание предполагает существенное повышение точностных показателей навигационного оборудования, а также надёжности всех подсистем робота. Аппараты такого типа должны обладать способностью к действиям в сложной навигационной обстановке (в том числе ледовой), а также в условиях интенсивного судоходства.

<sup>1</sup> 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: +7 (4232) 215545, доб. 603. E-mail: boreyko@marine.febras.ru, inzar@marine.febras.ru

<sup>2</sup> 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30. Тел.: +7 (921) 7632345. E-mail: aimashoshin@mail.ru, iv@bk.ru

Проблема создания СУ ещё более усложняется возможным отсутствием связи с оператором на протяжении большей части маршрута АНПА длиной несколько тысяч километров. Как показала мировая практика, стоимость создания систем управления подобного класса может в разы превышать стоимость самого объекта управления.

Статья содержит краткое изложение подходов, примененных при разработке СУ АНПА большой автономности.

### 1. Структура системы управления АНПА большой автономности

Система управления АНПА должна обеспечить выполнение заданной миссии путём управления широким спектром технических средств АНПА, типовой набор которых включает:

- систему навигации (СН), в функции которой входят:

- определение текущих координат АНПА и их ошибок методом счисления пути с использованием инерциальной навигационной системы и абсолютного (в мелких морях) либо относительного лага, с учётом периодического позиционирования АНПА;

- расчёт параметров движения АНПА для обеспечения движения по заданному маршруту и навигационной безопасности, а также для решения других задач;

- систему гидроакустического позиционирования (СПП) по сигналам донных, заякоренных или дрейфующих маяков-ответчиков, установленных в реперных точках маршрута АНПА;

- систему радионавигационного позиционирования (СРНП) с использованием сигналов стационарных и мобильных радионавигационных станций;

- систему спутникового позиционирования (ССП) по сигналам глобальных спутниковых навигационных систем;

- гидроакустическую систему освещения обстановки (ГСОО) в активном и пассивном режимах работы;

- систему гидроакустической связи (СГС);

- систему радиосвязи (СРС);

- систему генерации и распределения электроэнергии (СГРЭ);

- движительно-рулевой комплекс (ДРК);

- систему дифферентовки (СД);

- систему аварийной сигнализации (светосигнальной, гидроакустической, радиопередающей и спутниковой).

СУ АНПА относится к системам управления наивысшей сложности, что обусловлено необходимостью управлять в реальном времени большим количеством разнородных технических средств и при этом функционировать в полностью автоматическом режиме при ограниченных возможностях автономной подводной навигации и связи с пунктом управления. Известно [8, 9], что построить подобную СУ как централизованную (мультиобъектную) весьма затруднительно ввиду её высокой сложности. Для построения СУ АНПА в наибольшей степени подходит децентрализованная мультиагентная структура (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема СУ АНПА

При таком подходе управление всеми функциями АНПА осуществляется путём взаимодействия на основе равноправного общения всех систем-агентов, имеющих собственные системы управления. Подход полностью себя оправдывает при разработке сложных комплексов, предполагающих интеграцию значительного количества систем, создаваемых соисполнителями. Можно отметить следующие принципиальные особенности данного подхода:

- функциональные модули АНПА создаются в виде законченных программно-аппаратных систем-агентов. При этом модули проектируются максимально автономными, функции управления сосредоточены внутри самого модуля, взаимодействие с «внешним миром» осуществляется высокоуровневыми командами и структурами данных. Системы-агенты могут самостоятельно устанавливать между собой необходимые информационные связи;

- информационное взаимодействие модулей осуществляется с использованием унифицированных каналов обмена данными, обеспечивающих лёгкое подключение и отключение модулей от

системы. На канальном уровне для этих целей может использоваться, например, высокоскоростной Ethernet;

- для построения вычислительной системы СУ используются унифицированные модули, обеспечивающие резервирование вычислительных мощностей;
- взаимодействие между агентами организуется с использованием унифицированных информационных сообщений, циркулирующих на базе специализированной программной платформы [10]. Последняя поддерживает событийную модель информационного обмена, обеспечивает динамическое подключение и отключение агентов от системы, а также их прозрачное информационное взаимодействие. Подобная организация взаимодействия максимально приспособлена к реконфигурации СУ, связанной со сменой оборудования АНПА.

Совокупность систем-агентов замыкает в себе реализацию всех функций, зависящих от аппаратного обеспечения конкретного АНПА. Для того чтобы взаимодействие агентов имело целенаправленный характер, предусмотрен специальный агент-диспетчер, организующий выполнение сценария миссии, описанного в виде заранее подготовленного маршрутного задания (МЗ). МЗ содержит описание последовательности действий, которые должен совершить АНПА, с привязкой этих действий ко времени и географическим координатам. Набор агентов, при-

влекаемых на каждом шаге миссии для выполнения предписанных действий, выбирается диспетчером автоматически. Для выполнения описанных функций агент-диспетчер имеет сложную структурную организацию, на описании которой остановимся несколько ниже.

Получив от диспетчера задание на ближайший период времени, система-агент организует его выполнение с учетом сложившейся ситуации и имеющихся технических возможностей. При необходимости для реализации задания системой привлекаются другие агенты. О результатах выполнения задания агент сообщает диспетчеру. Если поступившее задание по каким-либо причинам не было выполнено (наличие неисправностей, нехватка электроэнергии и др.), то это влечёт за собой изменение диспетчером плана оставшейся части миссии.

## 2. Агент-диспетчер

Диспетчер является сложным программным агентом, также имеющим мультиагентную структуру. Диспетчер реализуется на базе гибридной управляющей архитектуры, в основе которой лежит трехуровневая модель рационального поведения, включающая оперативный, тактический и стратегический уровни формирования управления [1, 11]. Особенностью функционирования диспетчера является использование поведенческих управляющих



Рис. 2. Трёхуровневая структура диспетчера

структур (многоуровневых структур с поглощением) на тактическом уровне. Такой подход имеет большой потенциал по возможностям реконфигурации и наращиванию функциональности диспетчера (рис. 2).

Функциональность уровней агента-диспетчера распределяется следующим образом.

### 2.1. Стратегический уровень

Стратегический уровень обеспечивает логику выполнения миссии в целом, с учётом возможного изменения общего плана со стороны контрольно-аварийной системы (КАС) АНПА или при вмешательстве человека-оператора. Для этого уровень содержит нерезидентный компонент (собственно описание миссии) и резидентные модули: планировщик миссии, модуль КАС и базу данных районов плавания.

Миссия готовится вне аппарата и загружается в АНПА непосредственно перед запуском. Модель использования АНПА предполагает перемещение из точки старта в точку финиша по заранее заданной траектории. При этом по мере прохождения маршрута должны быть задействованы различные устройства полезной нагрузки (для выполнения океанографических, гидрографических и иных измере-

ний), а также меняться режимы движения. Должно учитываться время прохождения приливных зон или участков со сложной ледовой обстановкой. Кроме того, должны быть предусмотрены удобные места и время выхода на связь с оператором, проведение навигационных обсерваций для уточнения координат с использованием радионавигационных средств, а также места прохождения вблизи подводных средств позиционирования (для уточнения координат без выхода на поверхность).

Для удовлетворения всех этих требований оптимальным является кусочно-линейное представление миссии. При этом изменение режимов движения и работы аппаратуры АНПА производится в узлах ломаной, а движение вдоль очередного отрезка выполняется с постоянными параметрами [12]. Миссия описывается в виде последовательности элементов маршрутного задания (ЭМЗ).

Каждый ЭМЗ содержит информацию о целевой точке представляемого им отрезка маршрута, используемой аппаратуре, а также о режимах движения АНПА на отрезке (рис. 3). ЭМЗ предполагает расширенное представление понятия «переход в целевую точку». В случае использования во время выполнения ЭМЗ исследовательской аппаратуры (например, гидролокатора бокового обзора или донного

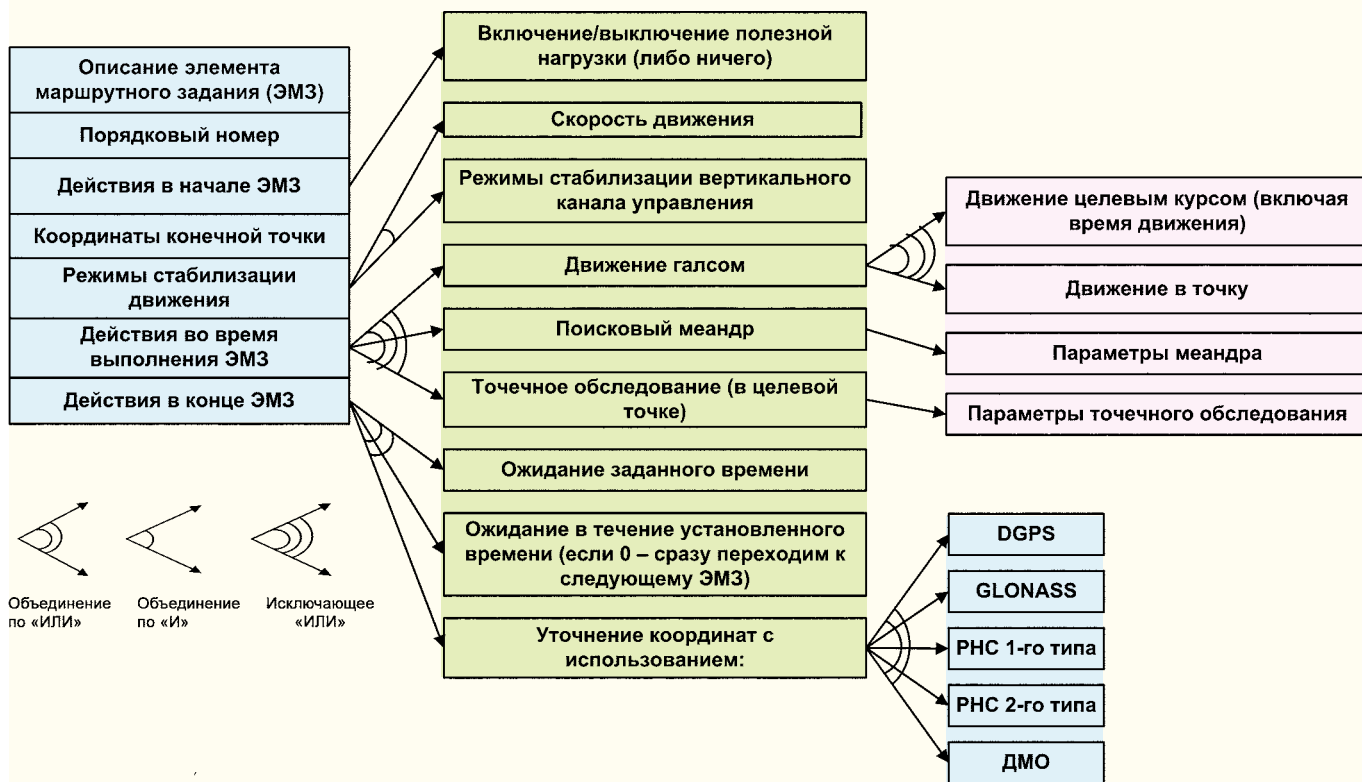


Рис. 3. Структура элемента маршрутного задания

профилографа) движение в целевую точку может происходить по траектории типа «прямоугольный меандр». Кроме того, в целевой точке может выполняться позиционирование (например, с целью детального фотографирования донной поверхности и каких-либо объектов).

*Планировщик* служит для упорядочения достижения целей миссии. В функции планировщика входят:

- выбор из последовательности ЭМЗ задачи, пригодной к выполнению (в порядке описания или с использованием каких-либо других критериев);
- определение для тактического уровня поведения-агента и параметров его работы, необходимых для решения выбранной задачи;
- инициирование окончания миссии в случае отсутствия активных задач или в аварийных ситуациях, когда выполнение миссии далее невозможно.

Для учёта внутреннего состояния АНПА при определении очередной задачи миссии планировщиком используется связь с *модулем КАС*. КАС обеспечивает как безопасность робота под водой, так и его устойчивость к сбоям подсистем, что повышает вероятность выполнения задания. КАС предпринимает необходимые действия при возникновении аварийных ситуаций. Основной информацией, которой оперирует КАС, являются сигналы, вырабатываемые средствами самодиагностики функциональных модулей аппарата (внутренняя информация), а также параметры, измеряемые датчиками внешней среды и навигационной системой АНПА (внешняя информация). На основе интегральной оценки состояния бортовых систем КАС определяет возможность продолжения миссии.

В состав уровня входят *база данных* (БД) с гидрологической и иной информацией о районах предполагаемого плавания, а также дополнительные данные и настройки, связанные с условиями работы и необходимые для корректной работы АНПА (например, список маяков-ответчиков вдоль по маршруту следования). Информация из БД используется планировщиком для верификации достижимости очередной целевой точки миссии и изменение траектории при необходимости.

## 2.2. **Тактический уровень**

*Тактический уровень* организует выполнение очередного элемента миссии, определенного к реализации стратегическим уровнем на ближайшее время. Особенностью уровня является формирование плана действий с использованием многоуровневых структур управления [11]. Структуры динамически

составляются из имеющегося набора (библиотек) агентов (миссии, КАС и телеуправления) в зависимости от выполняемой в настоящий момент задачи (см. рис. 2). Взаимодействие этих разнородных агентов в рамках временно существующей структуры позволяет учитывать текущую обстановку (вмешательство со стороны головного модуля КАС, телеуправления), а также ситуацию, складывающуюся на нижних уровнях иерархии.

В задачи *агентов миссии* входит преобразование элементов маршрутного задания, получаемых от планировщика, в командные сообщения для систем-агентов и регуляторов движения. Агенты миссии поддерживают реализацию траекторий движения, предусмотренных в ЭМЗ. Агенты миссии также производят проверку достижимости целевой точки и, при необходимости, осуществляют перепланирование маршрутного задания на заданном отрезке движения с использованием информации, размещенной в базе данных.

Тактический уровень может изменять цели, определяемые агентом миссии (т.е. цели работы оперативного уровня) в следующих случаях:

- при получении команды телеуправления, связанной с установкой новой целевой точки или режимов движения;
- при выявлении аварийной ситуации на борту;
- при обнаружении препятствия, наличие которого делает невозможным прямолинейное движение в заданную целевую точку.

Для реализации этих функций уровень содержит *модуль телеуправления* и *обхода препятствий*, которые, по сути, также являются агентами и функционируют в составе общей управляющей структуры тактического уровня.

Реактивная коррекция траектории осуществляется в модуле обхода препятствий. Его задачей является обеспечение безопасности при движении АНПА, для чего используются данные от эхолотаторов [13] или ГСОО. В зависимости от оперативной обстановки возможно как огибание локального препятствия, так и его обход.

Главной задачей *агентов КАС* является локализация и устранение причины аварийной ситуации путем активных манипуляций с оборудованием АНПА. При этом выполнение основной части миссии приостанавливается. Примером такого агента КАС является агент обеспечения заданной точности навигации. В случае критического понижения точности определения координат агент КАС прерывает миссию и проводит необходимые процедуры для выполнения обсервации.

Взаимодействие оператора с системой управления АНПА во время выполнения миссии организовано посредством *модуля телеуправления/телеметрии*, который принимает по доступным каналам связи команды телеуправления и организует их выполнение на борту АНПА.

### 2.3. Оперативный уровень

*Оперативный уровень* предоставляет необходимый набор средств для реализации элемента миссии (обеспечение заданных режимов движения, комплексирование навигационных данных, средства контроля безопасности АНПА на рефлекторном уровне и т.п.). Для этого уровень содержит регуляторы движения, агрегатор навигационных данных, модель динамики АНПА и средства диагностики движения, а также средства восстановления работоспособности системы. В то же время уровень в максимальной степени абстрагирован от особенностей технической реализации конкретного АНПА и организует скоординированную работу бортового оборудования посредством систем-агентов, упомянутых выше (см. рис. 1). Остановимся на некоторых особенностях работы модулей оперативного уровня.

*Модуль контроля навигационных данных* (агрегатор) предназначен для проверки корректности навигационных данных, поступающих от навигационного агента, путем их сравнения с результатами расчета модулей динамики подводного аппарата и диагностики движения АНПА. При необходимости модуль может кратковременно брать на себя функции агрегатора навигационных данных и считать положение АНПА, используя для замены некорректных или отсутствующих параметров их модельные расчетные значения.

Основная задача *модуля расчета динамики* – по заданным управляющим воздействиям рассчитывать локальные перемещения и скорости АНПА по всем шести степеням свободы. Исходными данными служат вектор численных координат и вектор предполагаемой скорости. В задачи модуля не входит высокоточное моделирование всех динамических процессов, так как решение подобной задачи часто требует больших вычислительных ресурсов. Однако применение упрощенной модели динамики позволяет:

- определять грубые неисправности в показаниях навигационных датчиков;
- детектировать неисправности движительно-рулевого комплекса и балластно-дифферентовочной системы;

- иметь возможность краткосрочного управления АНПА с временно отсутствующими показаниями некоторых сенсорных устройств (например, во время аварийной перезагрузки инерциальной навигационной системы).

*Модуль диагностирования* навигационно-пилотажных датчиков и элементов ДРК АНПА решает следующие задачи:

- определяет степень достоверности навигационных данных;
- использует избыточность навигационной информации для компенсации вышедших из строя датчиков;
- определяет неадекватность ДРК (возможные аварии двигателей и подруливающих устройств).

Для централизованной обработки объектов и препятствий в толще воды и на поверхности дна предусмотрен *модуль сцены*. Основное назначение модуля – сбор информации от разнородных средств освещения подводной обстановки и сенсорных устройств АНПА об обнаруженных объектах и препятствиях. На выходе модуля генерируется унифицированное сообщение об обнаруженных объектах, которое поступает на вход модуля обхода препятствий.

*Средства проверки и восстановления работоспособности вычислительной системы* включают модули контроля работоспособности и модули сохранения (логирования) текущего состояния, запущенные на всех узлах вычислительной сети СУ. Совместная работа этих модулей обеспечивает:

- автоматический выбор «ведущих» и «ведомых» компьютеров;
- взаимный контроль работоспособности компьютеров;
- перехват управления «ведомым» компьютером и возобновление выполнения миссии с прерванной точки в случае выхода из строя «ведущего» компьютера;
- перезапуск вышедшего из строя компьютера.

Оперативный уровень диспетчера непосредственно взаимодействует с остальными системами-агентами СУ.

### 3. Сценарий выполнения типовой миссии АНПА

Подготовка маршрутного задания для АНПА (его формализация, представление в виде последовательности ЭМЗ) производится по предварительно составленному плану миссии, который учитывает все обстоятельства, перечисленные в п. 2.1. Маршрутное задание должно пройти этап проверки

(верификации) в режиме off-line на предмет соответствия плану действий и выполнимости. Для этого используется специальный программно-аппаратный комплекс, позволяющий моделировать внешнюю обстановку и функционирование всех систем АНПА. При проверке оцениваются необходимые энергетические затраты на прохождение маршрута, работу бортового оборудования, достижимость целевых точек. В последнем случае для проверки используется информация из базы данных районов плавания. Особенность верификации маршрутного задания для аппаратов большой автономности заключается в невозможности использования полноценного моделирования траектории по всему маршруту следования с учетом динамических характеристик подводного робота. Поэтому используется «кинематический подход», учитывающий только оценочные затраты АНПА для выполнения того или иного элемента маршрутного задания.

Проверенное маршрутное задание загружается в АНПА для выполнения. Предварительно по команде диспетчера системы-агенты самостоятельно производят предстартовую проверку бортового оборудования АНПА. Кроме того, оцениваются объем и наличие ресурсов АНПА, необходимых для выполнения задания (ёмкости накопителей информации, объема энергии).

После успешного прохождения проверки АНПА начинает выполнение миссии. Для интерпретации очередного ЭМЗ в диспетчере активизируется соответствующий агент миссии, реализующий движение в целевую точку, выполнение обзорных операций, всплытие для выхода на связь и т.п. Однако сначала задачи текущего ЭМЗ проверяются на выполнимость, а также на целесообразность их выполнения. При этом принимаются в расчёт:

- текущее состояние и работоспособность полезной нагрузки АНПА, если предусмотрено использование таковой;
- фактическое положение АНПА, которое может не соответствовать программному в силу ряда причин (накопившаяся навигационная ошибка, изменение хода миссии из-за вмешательства оператора, маневрирование АНПА при обходе неучтенных препятствий, активности агентов КАС);
- работоспособность движительно-рулевого комплекса и доступные режимы движения.

С учетом сложившейся обстановки агент миссии может перепланировать траекторию движения АНПА на текущем ЭМЗ с использованием глобальной информации из базы данных. Агент определяет

новую траекторию движения в конечную точку ЭМЗ с обходом участков, запрещенных для плавания. Во время движения всегда активизирован агент-поведение, обеспечивающий реактивный обход неучтенных препятствий на основе информации от средств освещения подводной обстановки.

При движении по маршруту производится контроль накапливающейся навигационной ошибки, которая не должна превышать допустимой величины. В противном случае необходимо выполнить позиционирование (обсервацию). Следует отметить, что позиционирование АНПА может осуществляться с использованием:

- 1) спутниковой навигационной системы;
- 2) радионавигационной системы;
- 3) подводной навигационной системы дальнего действия [14–16];
- 4) донных маяков-ответчиков (ДМО);
- 5) излучателей, установленных в реперных точках маршрута;
- 6) естественных геофизических полей;
- 7) пассивных подводных ориентиров.

В штатном режиме накопившаяся ошибка автоматически сбрасывается с использованием средств 3–7. Если же этого не произошло, то активизируется агент КАС, который принимает решение о выполнении позиционирования АНПА и выбирает метод позиционирования, имеющий наивысший приоритет для текущего района плавания. В зависимости от выбранного метода позиционирования агент КАС осуществляет поиск места выхода на поверхность для проведения обсервации (и/или для связи с оператором) либо производит поиск ДМО или других донных ориентиров. Этот же агент активизируется при возникновении аварийных ситуаций на борту АНПА, делающих невозможным продолжение миссии. Глобальную оценку выполнимости оставшейся части миссии производит агент КАС стратегического уровня.

Системы-агенты АНПА самостоятельно поддерживают работоспособность управляемых ими функциональных модулей. При этом в случае обнаружения неисправности информация о возникших ограничениях передается агенту миссии, который принимает решения о возможности продолжения или изменения режимов выполнения текущего ЭМЗ.

Миссия АНПА считается законченной после исчерпания загруженного списка ЭМЗ. Далее реализуется сценарий по стандартному подъему АНПА на поверхность и выходу на связь с оператором.

#### 4. Пример функционирования системы управления АНПА

В качестве примера рассмотрим сценарий взаимодействия агентов СУ при решении задачи обеспечения навигационной безопасности АНПА во время выполнении миссии. Обеспечение навигационной безопасности АНПА предполагает своевременное обнаружение неподвижных и подвижных навигационных препятствий и обход или расхождение с ними. Поскольку неподвижные навигационные препятствия, как правило, не излучают гидроакустические шумы и сигналы, их обнаружение возможно только в активном режиме работы ГСОО. Подвижные навигационные препятствия (подводные лодки, надводные корабли, АНПА) могут обнаруживаться как в активном, так и в пассивном режиме работы ГСОО. Поскольку работа и того, и другого режима работы ГСОО сопряжена с расходом запаса электроэнергии, необходимо организовать гибкое управление работой ГСОО. Один из вариантов этого управления, адаптированный к текущим характеристикам маршрута по критерию минимума потребляемой электроэнергии, приводится ниже.

Источниками информации для адаптации являются:

- цифровая навигационная карта маршрута, заложенная в память диспетчера;
- текущие численные координаты АНПА;
- вычисленное системой навигации максимальное значение текущего отклонения истинного места АНПА от числимого  $\Delta R_{max}$ ;
- вычисленная исходя из измеренного вертикального распределения скорости звука среднегогоризонтальная скорость распространения гидроакустического сигнала  $C_{зв}$ ;
- минимальное расстояние до навигационного препятствия, на котором АНПА должен начать манёвр расхождения с ним,  $R_{min}$ ;
- вычисленная для текущих гидроакустических условий минимальная дистанция обнаружения опасных подвижных объектов  $D_{обн/min}$  и максимальная скорость сближения с ними  $V_{сбл/max}$ ;
- максимальная шкала освещаемой дальности в активном режиме работы ГСОО  $R_{uw/max}$ .

Применительно к активному режиму работы ГСОО адаптация осуществляется следующим образом. С использованием цифровой карты периодически (1 раз в 5–10 минут) диспетчер определяет расстояние  $R_{np}$  впереди по курсу АНПА до ближайшего неподвижного навигационного препятствия (береговая черта, опасные возвышенности подводно-

го рельефа и др.) и вычисляет время  $\Delta T_{AP}$  в течение которого АНПА может плыть без использования активного режима работы ГСОО:

$$\Delta T_{AP} = \frac{R_{np} - \Delta R_{max} - R_{min}}{V_{АНПА}}, \quad (1)$$

где  $V_{АНПА}$  – текущая скорость АНПА.

$$\Delta T_{ЗС} = \frac{R_{uw/max} - R_{min}}{V_{АНПА}}. \quad (2)$$

Как только величина  $\Delta T_{AP}$  приблизилась к нулю, диспетчер по формуле (2) рассчитывает период излучения зондирующего сигнала (ЗС) и посылает заявку ГСОО на включение активного режима работы ГСОО на максимальной шкале освещаемой дальности. ГСОО определяет техническую возможность включения активного режима. Для этого он запрашивает у СГРЭ наличие необходимого запаса электроэнергии, а также проводит диагностику активного режима ГСОО. При положительных результатах определения технической возможности СУ ГСОО даёт команду на включение активного режима для работы на максимальной шкале дистанции.

При обнаружении препятствия и определении дистанции до него ГСОО посылает соответствующее сообщение диспетчеру. Диспетчер рассчитывает параметры манёвра уклонения от встречи с препятствием (обхода препятствия) и выдаёт в ДРК заявку на выполнение манёвра. Одновременно диспетчер выдаёт ГСОО заявку на периодическое отслеживание координат препятствия. При приближении к препятствию на минимально допустимое расстояние диспетчер снова выполняет действия, связанные с уклонением от препятствия.

После завершения расхождения с препятствием диспетчер:

- определяет параметры движения АНПА для возврата на маршрут и совместно с ДРК реализует этот план;
- сообщает ГСОО о завершении манёвра обхода препятствия. Получив это сообщение, ГСОО даёт команду на выключение активного режима.

При прохождении участка траектории со сложным рельефом дна либо с ледовым покровом диспетчер даёт заявку ГСОО использовать активный режим постоянно до тех пор, пока от диспетчера не поступит новая заявка.

Применительно к пассивному режиму работы ГСОО экономия электроэнергии достигается за счет периодического прослушивания окружающего пространства в течение нескольких минут. Интервал



времени между последовательными включениями пассивного режима рассчитывается по формуле:

$$\Delta T_{\text{нас}} = \frac{D_{\text{обл}/\text{min}} - R_{\text{min}}}{V_{\text{обл}/\text{max}}}. \quad (3)$$

Данная идеология реализуется следующим образом. На участке траектории, на котором возможно появление подвижных шумящих объектов, диспетчер выдаёт ГСОО заявку на периодическое прослушивание окружающего пространства. СУ ГСОО определяет интервал времени непрерывного прослушивания на одном цикле и по формуле (3) рассчитывает период между соседними интервалами. С учетом этих данных СУ ГСОО даёт команду на включение/выключение пассивного режима ГСОО. При обнаружении пассивным режимом шумящей цели, определении её класса, координат и параметров движения ГСОО посылает соответствующее сообщение диспетчеру, который организует расхождение с целью (уклонение от цели) описанным выше способом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие АНПА тяжёлого класса идёт по пути увеличения их информационной и энергетической автономности. Эксплуатация таких аппаратов невозможна без наличия надёжной и «интеллектуальной» системы управления, способной управлять в реальном времени большим количеством разнородных бортовых технических средств и самостоятельно принимать решения без связи с человеком-оператором. В материале статьи представлена концепция построения СУ для АНПА большой автономности, учитывающая опыт ИПМТ ДВО РАН и АО «Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"» по созданию систем управления для АНПА тяжёлого класса, а также по проектированию и эксплуатации интегрированных систем управления и навигации. В основе предлагаемой СУ лежит децентрализованная мультиагентная структура. Скоординированное взаимодействие агентов позволяет решить весь спектр стоящих перед СУ задач, а сама архитектура обладает потенциалом по модификации и наращиваемости системы. Данное обстоятельство особенно актуально при интеграции значительного количества разнородных функциональных модулей, в том числе созданных различными исполнителями проекта.

Система предполагается к реализации в одном из создаваемых АНПА большой автономности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00324) и программы Президиума РАН № 29 «Актуальные проблемы робототехнических систем».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток: Дальнаука, 2018. 368 с.
2. 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.
3. Боженов 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. P. 35–38.
5. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая топография», 2011. 304 с.
6. Белоусов И. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // *Зарубежное военное обозрение*. 2013. № 5. С. 79–88.
7. 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.
8. Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В. Многоагентные системы (обзор) // *Новости искусственного интеллекта*. 1998. № 2. С. 64–116.
9. Ржевский Г.А., Скобелев П.О. Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. Самара: Офорт, 2015. 290 с.
10. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G. Reconfigurable Distributed Software Platform for a Group of UUVs (Yet Another Robot Platform) // *Proc. of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Conference & Exhibition*. Monterey, California, USA, 2016.
11. Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В. Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // *Подводные исследования и робототехника*. 2013. № 1(15). С. 4–16.
12. Илларионов Г.Ю., Лаптев К.З., Матвиенко А.В. Подготовка и планирование глобального маршрута автономного необитаемого подводного аппарата дальнего радиуса действия // *Двойные технологии*. 2018. № 2 (83). С. 41–49.
13. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Планирование и реализация траекторий движения автономного подводного робота при выполнении мониторинга в акваториях различных типов // *Подводные исследования и робототехника*. 2016. № 2 (22). С. 25–35.
14. 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.
15. Пат. 2469346 РФ, МПК G01S3/80. Способ позиционирования подводных объектов / Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Голов А.А.; – № 2011128643/28; заявл. 07.11.2011; опублик. 10.12.2012, Бюл. № 34.
16. DARPA Broad Agency Announcement Positioning System for Deep Ocean Navigation (POSYDON). Strategic Technology Office, DARPA-BAA-15-30. – URL: <https://www.fbo.gov/utills/view?id=44545f3168bd6e1ed8fa70b16fbc7c7e> (дата обращения 30.04.2019).