

УДК 004.896+629.58

ПЛАНИРОВАНИЕ И ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ДЕЙСТВИЙ ОБСЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА НА БАЗЕ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МЕТОДОВ

**А. В. Инзарцев, А. М. Павин,
А. В. Багницкий**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий
Дальневосточного отделения РАН¹

Рассматриваются вопросы формирования поведения и описания задания (миссии), а также построения программного обеспечения информационно-управляющей системы (ИУС) исследовательского автономного необитаемого подводного аппарата-робота (АНПА). При создании системы в качестве единой методологической базы на различных уровнях функциональной трехуровневой архитектуры ИУС используются подходы поведенческой робототехники, что обеспечивает нетрудоемкое наращивание функциональности по мере появления новых задач и аппаратных средств. Библиотека поведений тактического уровня (агентов) составляет основу для декларативного описания миссии, что повышает уровень ее абстракции и позволяет осуществлять настройку АНПА под различные типы исследовательских задач. Обсуждаются вопросы реализации и практического использования архитектуры ИУС и библиотеки агентов при решении ряда исследовательских задач.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) нашли широкое применение для выполнения самых разнообразных подводных работ [1], все многообразие которых можно разделить на поисковые (называемые также обзорно-поисковыми) и исследовательские (или поисково-исследовательские). Подавляющее большинство выполняемых роботами операций принадлежит к задачам поискового класса: собственно поисковые и спасательные работы, батиметрические, океанологические и экологические измерения и мониторинг, противоминные операции и другие.

Имеются также успехи в использовании АНПА для выполнения поисково-исследовательских операций. К ним можно отнести проведение автоматической инспекции подводных коммуникаций (осо-

бенно в районах подводных нефтегазовых промыслов), поиск источника экологического загрязнения акваторий, оконтуривание аномалий различной физической природы и другие. Идеологически поисково-исследовательские работы являются надмножеством работ обзорно-поискового класса. Функции робота при их осуществлении заключаются в обнаружении (идентификации) искомого объекта (аномалии) и выполнении каких-либо действий, связанных с уточнением состояния объекта. Подобные операции требуют наличия на борту развитой системы формирования поведения, которая, к тому же, должна иметь возможность гибкого наращивания функциональности по мере появления новых задач обследования и бортовых сенсоров.

Современные успехи при выполнении исследовательских работ связаны, скорее, с демонстрацией потенциальных

возможностей АНПА, а не с их широким использованием для этих целей. Данная ситуация обусловлена сложностью использования АНПА для таких применений обычными пользователями и недостаточной формализованностью поисково-исследовательского класса задач. Во многом это связано с тем, что подобные разработки носят отладочный, тестовый характер, требуют постоянной модификации программного обеспечения аппарата. Способы задания миссии и их низкая декларативность сложны для потенциальных пользователей АНПА и требуют присутствия разработчиков [2].

Проблема является комплексной и заключается в следующем.

- Для исследовательских работ отсутствуют адекват-

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а; e-mail: inzar@marine.febras.ru, pavin@bk.ru, fazotron@list.ru

ные способы описания задания (миссии), а архитектура программного обеспечения информационно-управляющих систем (ИУС) аппаратов, в свою очередь, не поддерживает декларативных миссий, необходимых для возможности широкого использования АНПА. Недостаточная формализация поисково-обследовательского класса задач и, как следствие, способы задания миссии и их низкая декларативность сложны для потенциальных пользователей АНПА.

- Имеет место слабая методологическая проработка вопросов согласованного выполнения нескольких операций во время обследования, что необходимо при организации сложного поведения АНПА.

Далее рассматривается один из возможных вариантов решения указанной проблемы. В качестве методологической базы используются подходы поведенческой робототехники, которые находят свое отражение как в структуре программного обеспечения ИУС АНПА, так и в способе задания миссий. Статья построена следующим образом. В первой части обсуждается место поведенческой парадигмы в ряду известных парадигм построения систем управления роботами. Во второй и третьей частях рассматриваются особенности реализации поведенческого подхода в структурах тактического и стратегического уровней ИУС АНПА разработки ИПМТ ДВО РАН. Наконец, в четвертой части приводятся примеры практического использования указанного подхода для решения задач различных классов.

1. Парадигмы построения архитектуры ИУС

В классическом подходе информационно-управляющая система робота рассматривается как система, основанная на знаниях. Для планирования действий используется точное представление о среде в символьной форме, а решения принимаются на основе формальных рассуждений. Архитектуры систем, построенные в соответствии с указанной парадигмой, принято называть *делиберативными*. Основой обозначенной парадигмы является гипотеза физической символической системы, сформулированная Ньюэллом и Саймоном [3].

Одна из первых хорошо известных систем, в которой использовались методы автоматического планирования последовательности действий, выполнение которых приведет к некоторой желаемой цели, — STRIPS [4]. Эта система действовала на основе символического описания мира и состояния желаемой цели, а также описания множества операций, характеризующихся пред- и постусловиями. Она находила последовательность действий, которая вела к желаемому результату, на основе простого анализа средств и целей. При этом по существу постусловия операций связывались с желаемой целью. Применение делиберативной архитектуры в автономных роботах впервые описано в работе [5].

К безусловным достоинствам такой архитектуры можно отнести ее строгую формальность. Однако архитектура ориентирована на использование робота в хорошо структурированной и наблюдаемой среде, а высокие требования к вычис-

лительной мощности и низкая гибкость крайне затрудняют ее применение в АНПА.

Многие неразрешимые в рамках делиберативных архитектур задачи привели к развитию *реактивных (поведенческих)* архитектур. В значительном числе случаев невозможно, затруднительно или нерационально формировать централизованную символическую модель мира и генерировать полный план до начала действий. Выше уже говорилось, что это обусловлено сложностью, неполнотой информации и ограниченной наблюдаемостью среды. При реактивном планировании отсутствует генерация всего плана заранее. После выполнения одного или нескольких действий запускается процедура регенерации плана относительно своего текущего состояния [6].

Впервые поведенческая парадигма была сформулирована Бруксом, в работах которого выдвинуто три тезиса [7]:

1. Интеллектуальное поведение можно сформулировать без явного представления того, что предлагает символический искусственный интеллект.

2. Интеллектуальное поведение можно сформулировать без явного упоминания обобщенного вывода.

3. Интеллект — проявление свойств некоторых сложных систем.

С этой точки зрения процесс управления можно декомпозировать не на базе внутреннего разделения действий, а на базе желаемых *внешних* проявлений деятельности системы управления роботом. Поведение робота определяется некоторой композицией операций нескольких субъектов (*поведений* или *агентов*). Действия каждого из поведений направлены на до-

стижение определенной цели, отклик основан на текущих сенсорных данных, а объектом действия является подмножество объектов всей задачи.

Поведенческие схемы управления [6] представляют собой структурированную сеть взаимодействующих субъектов. Характерной чертой поведенческой архитектуры являются низкие требования к вычислительным ресурсам, что объясняется отсутствием затрат на поддержание глобальной модели внешней среды. Поведение осуществляет управление роботом в терминах *управляющих функций* (УФ). Каждая УФ использует подмножество исполняющих устройств робота $a_i \subset A$ и подмножество сенсоров $s_i \subset S$ для сведения к нулю подмножества ошибок состояния e_i на основе оценки подмножества последовательных состояний АНПА $x_i \subset X$. Поведение описывается как выполнение определенной последовательности УФ, каждая из которых доводится до завершения. Соответственно миссия робота может быть специфицирована как последовательность выполняющихся поведений.

Основная проблема поведенческого подхода возникает при одновременном использовании

различными поведением тактиками УФ (например, i -й и j -й), что $a_i \cap a_j \neq \emptyset$. Конфликт управлений устраняется в координирующем устройстве по-разному [6]. К известным методам разрешения этих противоречий можно отнести конкурентные методы с жесткой иерархией (доминированием или категоризацией) и с выбором действия на основе оценки уровня активности каждого из поведений (рис. 1).

Другим, более «демократичным», конкурентным методом является метод «голосования» за действия, генерируемые поведением (рис. 2, а). Поведение, набравшее наибольшее количество голосов, допускается к управлению. Впервые такая политика была применена в архитектуре DAMN (Distributed Architecture for Mobile Navigation) [8].

Альтернативой соревновательным методам выступает метод суммирования (рис. 2, б), когда в управлении участвуют все поведенья посредством взвешенного суммирования всех их выходов.

Приведенные методы координации работы группы поведений ориентированы на решение различных классов задач.

Например, для реализации метода потенциалов [9] в задачах выбора траектории движения АНПА наиболее подходящим представляется использование архитектуры с суммированием. В задачах движения в сложных условиях, подразумевающих активное переключение различных режимов и алгоритмов, более подходящим является метод выбора действия. Наконец, при взаимодействии сложных поведений, выполняющих некоторые последовательности действий, более подходящим является использование архитектуры с доминированием. В целом конкурентные методы с доминированием обеспечивают большую устойчивость, чем методы совместной координации, так как поведенья, отвечающие за безопасность, могут действовать без помех в опасных ситуациях [10, 11].

Резюмируя, можно сказать, что к преимуществам поведенческой архитектуры относятся простота реализации, гибкость (наращиваемость) и невысокие требования к вычислительным ресурсам, что является одним из основных параметров для АНПА. К очевидным недостаткам такой архитектуры можно отнести большое влияние субъективного фактора при распределении приоритетов, функций и способа взаимодействия поведений.

Некоторыми исследователями [12] высказано соображение, что ни делиберативный, ни реактивный подходы не являются достаточными для создания систем управления роботами. Очевидное решение состоит в сочетании делиберативной и реактивной подсистем [13]. Первая компонента содержит символическую модель мира, генерирует планы и реализует их методами символических вычислений. Вторая компонента способна

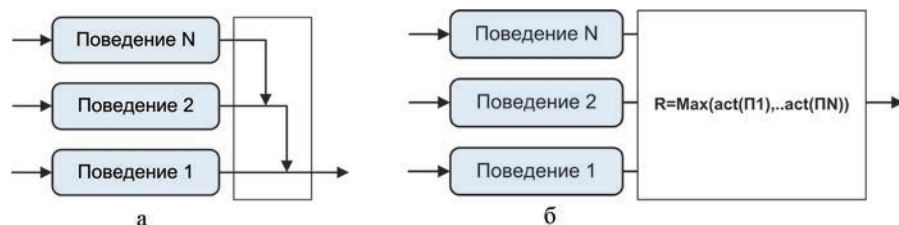


Рис. 1. Конкурентные методы с доминированием (а) и с выбором действия по оценке активности (б)

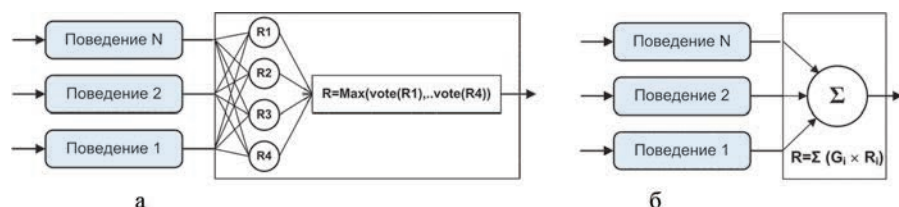


Рис. 2. Архитектуры с голосованием (а) и с суммированием (б)

к реакции на события, происходящие в среде, без участия в сложных рассуждениях.

По отношению к подводной робототехнике подобная система впервые описана в [14] под названием *модель целесообразного поведения (rational behaviour model, или RBM)*. RBM постулирует не состав и взаимосвязи модулей, а обосновывает три уровня иерархии с фиксированным распределением функций между ними (стратегический, тактический и исполнительный). При этом вопрос о способах реализации каждого из этих уровней остается открытым.

Применяемая в АНПА архитектура должна удовлетворять требованиям минимальной ресурсоемкости, гибкости и наращиваемости. В ИПМТ ДВО РАН используется гибридная архитектура, за основу которой была взята трехуровневая модель RBM [1]. Особенностью рассматриваемой далее архитектуры является использование поведенческих управляющих структур (многоуровневых структур с поглощением) на исполнительном и тактическом уровнях. Такой подход обеспечивает возможность явной спецификации заданий для АНПА на верхнем уровне, обеспечивая при этом удовлетворение требований по ресурсам и наращиваемости. Поведения тактического уровня далее называются «агентами» (в отличие от поведений исполнительного уровня, которые в рамках данной статьи не рассматриваются).

Функции трех уровней системы распределяются следующим образом.

Исполнительный уровень системы осуществляет сервоконтроль за основными параметрами движения и обеспечивает рефлекторные функции аппарата. Для этого он содержит полный набор

компонентов информационно-измерительной и управляющей систем. Уровень проектируется таким образом, чтобы замыкать в себе реализацию всех функций, зависящих от аппаратного обеспечения конкретного робота, предоставляя для взаимодействия с тактическим уровнем аппаратно-независимый интерфейс совокупности управляющих функций.

Тактический уровень служит для организации выполнения очередной задачи, поставленной стратегическим уровнем, и непосредственно управляет режимами и целями исполнительного уровня. Для этого уровень содержит набор агентов и арбитр, который поддерживает управляющую структуру агентов для решения текущей задачи.

Стратегический уровень представлен программой-заданием, содержащей описание целей текущей миссии АНПА. Для упорядочения достижения целей в общем случае используется планировщик.

2. Поведенческие структуры тактического уровня

Целью функционирования тактического уровня является выполнение очередной задачи, выделенной на стратегическом уровне из общей миссии. Средства для достижения цели предоставляются исполнительным уровнем.

Для достижения указанной цели тактический уровень содержит реализацию функционала (библиотеку агентов), предназначенную для решения целевого класса задач. Библиотека агентов формируется так, чтобы любая задача целевого класса могла быть решена путем комбинации и совместного функционирования нескольких элементов библиотеки. Каждый

элемент библиотеки предназначен для решения частной задачи, выделенной в результате декомпозиции исходных целевых задач. Входными параметрами для агента является описание ограничений и условий выполнения задачи. Выходными параметрами является поток императивных команд для исполнительного уровня.

Основной проблемой является выбор агента, необходимого для выполнения очередного фрагмента задачи в текущий момент. В классической постановке эта задача решается на стратегическом уровне системы управления, что требует наличия выводящей (производной) машины и значительных вычислительных мощностей.

Поскольку каждый агент тактического уровня решает частную задачу, а действия формируются на основе структурированной информации исполнительного уровня, то действия агента целесообразно осуществлять по принципу «восприятие – моделирование – планирование – действие». В соответствии с этим агент имеет структуру, включающую локальную модель среды, средства планирования действий на базе этой модели и анализа входной и выходной информации для определения работоспособности агента (рис. 3). Агент проектируется таким образом, чтобы обеспечить инкапсуляцию недекларативных деталей внутри себя (т.е. способ достижения поставленной цели должен выбираться автоматически на основе текущей и целевой информации).

В соответствии с логикой работы каждый агент имеет возможность воспринимать события и необходимые данные от исполнительного уровня. На основе этой информации обновляется локальная модель среды (рис. 3). Далее с использованием управляющих функций

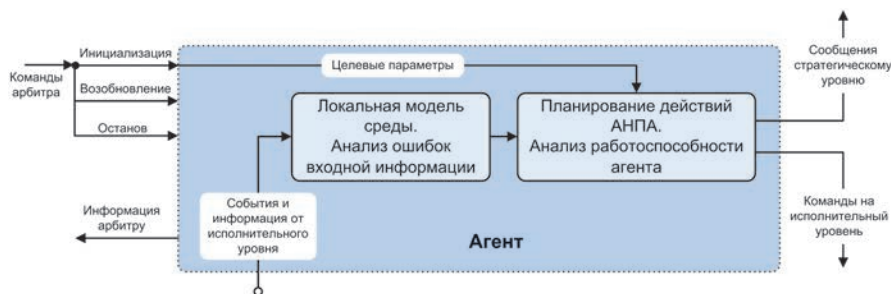


Рис. 3. Структура агента тактического уровня

формируется список действий для исполнительного уровня. Параллельно для стратегического уровня формируются сообщения о статусе достижения цели агента.

Агент может находиться в одном из нескольких состояний:

- активном (поддерживает модель внешней среды в актуальном состоянии и формирует списки команд для исполнительного уровня);
- пассивном (поддерживает модель внешней среды в актуальном состоянии, но управление не формируется).

Разновидностью пассивного состояния является состояние «ошибка», которое информирует стратегический уровень о невозможности выполнения агентом своих функций. Это состояние возникает при ошибочных входных данных либо при выходе из строя управляемых агентом исполнительных устройств.

В соответствии с принятой концепцией набор агентов, не-

обходимый для выполнения очередного этапа (или задачи) миссии, целевые параметры и ограничения для каждого из них определяются на стратегическом уровне. Список агентов передается в тактический уровень вместе с условиями их активизации. Таким образом, задача тактического уровня сводится к созданию, поддержанию функционирования и ликвидации указанной группы агентов.

Обеспечение согласованного и непротиворечивого выполнения агентов осуществляется арбитром. Для этого арбитр на основании поставленной стратегическим уровнем задачи (т.е. списка используемых агентов) организует указанных агентов в многоуровневую структуру управления. Приоритеты каждого из агентов задаются на стратегическом уровне опосредованно, исходя из вложенности задач. При наличии нескольких слоев с равным приоритетом управление передается первому по времени

активизировавшемуся агенту. Агенты, необходимые для выполнения очередной задачи миссии, образуют конфигурируемый нулевой слой в управляющей структуре (рис. 4).

К получившейся управляющей структуре добавляется дополнительный фиксированный слой 1 с более высоким приоритетом (рис. 4), служащий для организации реакции на события, не предусмотренные в миссии (обработка команд телеуправления и действия контрольно-аварийной системы (КАС)). Таким образом, первоначальный план миссии при возникновении незапланированных ситуаций может быть детализирован путем «достраивания» его агентами из слоя 1.

В функции арбитра входит:

- прием от стратегического уровня списка агентов для решения текущей задачи (в общем случае списки могут поступать в произвольные моменты времени);
- порождение и инициализация указанной структуры агентов;
- арбитраж активных агентов в соответствии с приоритетами;
- сообщение стратегическому уровню о завершении очередной задачи.

Для возможности создания указанных управляющих структур уровень включает несколько наборов (библиотек) агентов.

Библиотека КАС содержит агенты обработки сложных аварийных ситуаций.

Библиотека телеуправления содержит агенты, реализующие реакции на команды оператора.

Библиотека агентов миссии используется для решения целевых задач.

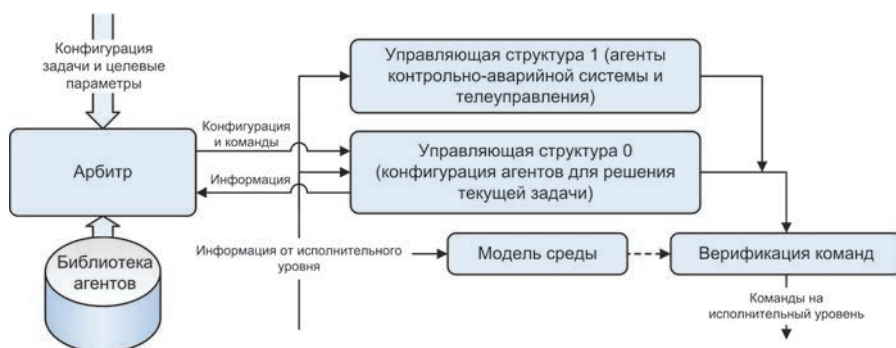


Рис. 4. Организация тактического уровня

3. Стратегический уровень формирования поведения АНПА

Миссия – это формализованное описание задания, которое должен выполнить АНПА во время запуска. Как правило, миссия готовится вне аппарата и загружается в АНПА непосредственно перед запуском.

В зависимости от степени априорного знания о районе работ миссии АНПА могут иметь разное представление. Действия любого мобильного робота в общем случае зависят как от текущего состояния самого робота, так и от состояния внешней среды. В случае стационарной, известной среды необходимые действия робота могут быть определены заранее, на этапе планирования миссии. Далее составленный план реализуется исполнительными подсистемами робота с использованием принципов программного управления. В соответствии с классификацией алгоритмов управления по объему необходимого информационного обеспечения [15] алгоритмы управления робота в данном случае относятся к алгоритмам с высоким априорным и малым текущим (апостериорным) информационным обеспечением.

В более сложном случае среда является стационарной, но заранее неизвестной, а система управления получает информацию о среде в процессе функционирования. В этом случае могут использоваться алгоритмы управления, относящиеся по упомянутой выше классификации к алгоритмам со средним апостериорным и средним или малым априорным информационным обеспечением. Задачи этого класса более сложные и должны решаться на борту в процессе функционирования робота. Миссии такого

класса в общем случае не могут быть представлены последовательностью действий робота и должны содержать описание целей его функционирования. Для их реализации потребуются привлечение средств также тактического и стратегического уровней.

Миссии первого типа далее будем называть императивными, а второго – декларативными. Характерным примером императивной миссии является обзорно-поисковая миссия, обеспечивающая покрытие известной акватории сетью заранее спланированных галсов. Таким же показательным примером декларативной миссии является поиск и обследование объекта на дне.

Усложнение решаемых АНПА задач, главным образом за счет включения в них функций обследовательского характера (инспекция подводных коммуникаций и сооружений, детектирование и маркировка различных искусственных объектов, патрулирование акваторий), требует развития способа представления заданий для АНПА по следующим направлениям:

- поддержка нелинейных (многовариантных) миссий;
- возможность динамического планирования миссии;
- повышение уровня абстрактности команд;
- многоуровневая степень детализации, соответствующая разным задачам и категориям пользователей.

Важны и такие качества, как лаконичность и удобочитаемость синтаксиса.

Среди решений для планирования миссий АНПА одними из наиболее известных являются: AVCL [16], CCL [17], MPL [18]. Однако ни один из этих языков не удовлетворяет совокупности требований, изложенных выше.

Кроме того, их синтаксис плохо использует преимущества, предоставляемые рассматриваемой поведенческой парадигмой. Интересной разновидностью языка, ориентированного на использование поведенческой парадигмы, можно считать объектно-ориентированный подход, предложенный в [19]. Однако в работе не рассмотрена важная проблема координации действий нескольких активных объектов.

Для успешного завершения обследовательских миссий задание для АНПА должно специфицироваться не в виде последовательности действий, а в виде набора целей, которые АНПА должен достичь. Причем в общем случае цели должны достигаться в оптимальном порядке (например, для минимизации времени выполнения миссии, длины траектории или энергозатрат). Решение такой задачи предполагает, что миссия АНПА должна содержать описание целей и информацию, на базе которой могут быть рассчитаны вес каждой цели (район работ, виды используемой аппаратуры, режимы движения), а также ограничения (допустимые районы работ, время выполнения миссии). Базой для создания декларативных миссий выступают объекты тактического уровня (агенты), набор и свойства которых формируется таким образом, чтобы обеспечить максимальную выразительность задания для робота.

Задание для АНПА формируется как список целей (объектов), каждый из которых содержит ограничения, используемые средства и условия инициализации (начало выполнения). В свою очередь, язык описания задания должен специфицировать управляющие структуры, создающиеся на тактическом уровне для реше-



Рис. 5. Абстрактный синтаксис языка описания заданий

ния каждой из подзадач миссии. Для языка описания задания был разработан абстрактный синтаксис, изображенный на рис. 5 и формируемый таким образом, чтобы обеспечивалась удобочитаемость миссии. Кроме того, синтаксис языка в явном виде позволяет описывать поведенческие структуры,

формируемые далее на тактическом уровне.

Согласно этому синтаксису миссия формируется как список простых и вложенных задач. Каждая задача характеризуется «целью» и «средствами» при соблюдении ряда «ограничений». Множество возможных значений «цель задачи» опреде-

ляется количеством реализованных на тактическом уровне АНПА агентов.

Простая задача имеет одну цель и, следовательно, конфигурирует одного агента на тактическом уровне. Вложенная задача имеет более одной цели. Цель вложенной задачи является дизъюнкцией целей входящих в нее подзадач. На тактическом уровне такая запись должна порождать управляющую структуру, количество слоев которой соответствует уровню вложенности, а приоритет каждого слоя соответствует уровню вложенности соответствующей задачи.

Значение «Средства» описывает используемые в данной задаче поисковые средства. Это значение может явно не указываться, если средства однозначно определены целью задачи. «Условия» определяют условия инициализации выполнения задачи (возникновение одного или нескольких зарегистрированных в системе событий). «Ограничения» описывают ограничения на выполнение задачи (район работ, максимальное время, допустимые параметры инспектируемых объектов и т.п.).

На рис. 6 в качестве примера приведено описание простой и вложенной миссий. В задачи «Простой миссии» входит съемка гидролокатором бокового обзора (ГБО) и фотосъемка двух районов. «Вложенная миссия» заключается в ГБО-съемке района № 1 и инспекции искусственного протяженного объекта (ИПО) в случае его обнаружения. Район № 2 должен быть обследован при отсутствии ИПО в районе № 1. В «Простой миссии» задачи никак не связаны между собой, и выполнение их может начаться в произвольном порядке (по умолчанию в порядке описания). Миссия заключается в последовательной

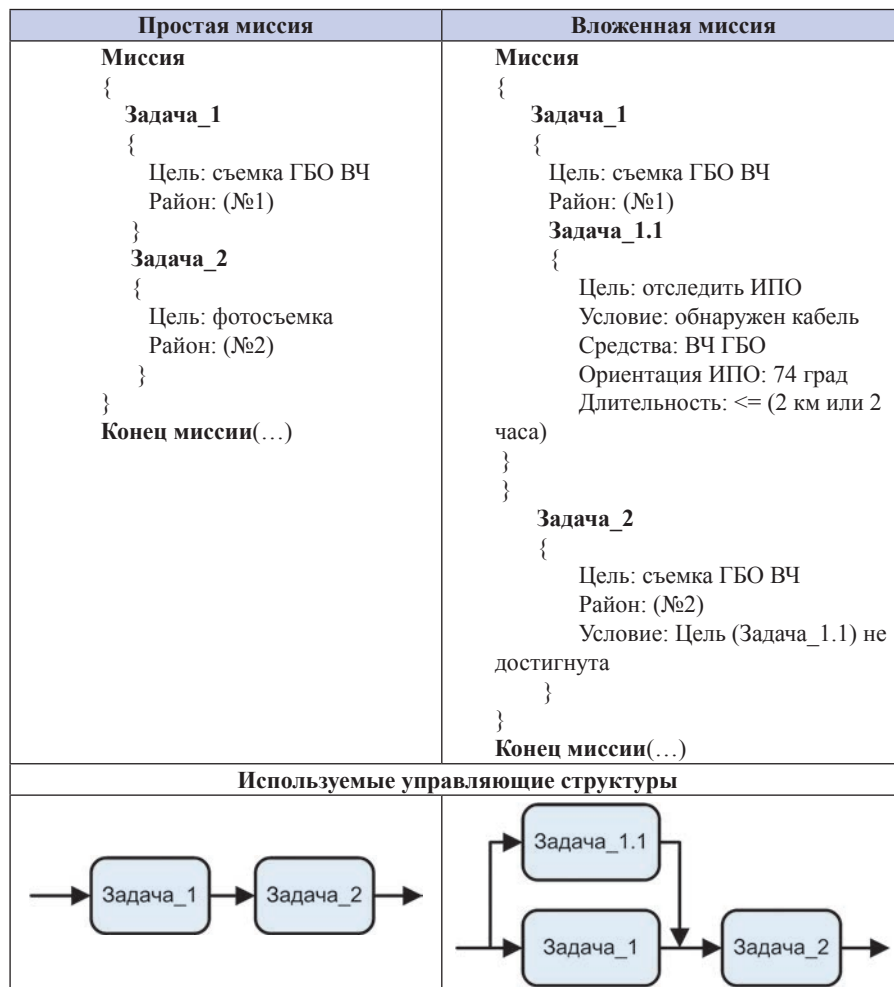


Рис. 6. Простая и вложенная миссии

инициализации двух агентов: «съемка ГБО ВЧ» (высококачественным ГБО) и «фотосъемка». Параметры съемки и движения АНПА выбираются агентами автоматически, исходя из описания покрываемого района и зоны охвата регистрирующей аппаратуры.

Вложенная миссия состоит из двух задач: вложенной и простой. Вложенной является Задача_1, которая включает Задачу_1.1 в качестве подзадачи. Задача_2 является простой. Задача_1 готова к выполнению. Ее целью является «ГБО-съемка района № 1 или отслеживание ИПО». Иными словами, цель этой задачи будет достигнута, если район № 1 будет полностью отснят или там будет обнаружен и отслежен ИПО.

Задача_1.1 вложена в Задачу_1, поэтому может быть активна только во время активности Задачи_1. Район работ наследуется из Задачи_1. Условие начала работы Задачи_1.1 – обнаружение ИПО во время выполнения Задачи_1. Кроме того, налагается ограничение на ориентацию отслеживаемого ИПО – 74° . Обнаруженные объекты с другой ориентацией инициировать работу Задачи_1.1 не будут.

Задача_2 может быть выполнена (не выполнена) только после завершения Задачи_1.1, поскольку анализирует условие ее окончания. Целью Задачи_1.1 является отслеживание ИПО, поэтому она будет *выполнена*, если трубопровод будет отслежен на длину 2 км или в течение 2 часов. О том, что Задача_1.1 *не выполнена* можно будет сказать только после окончания Задачи_1, поскольку Задача_1.1 к ней привязана. Иными словами, Задача_2 будет выполняться только в том случае, если ИПО в Районе № 1 не будет обнаружен.

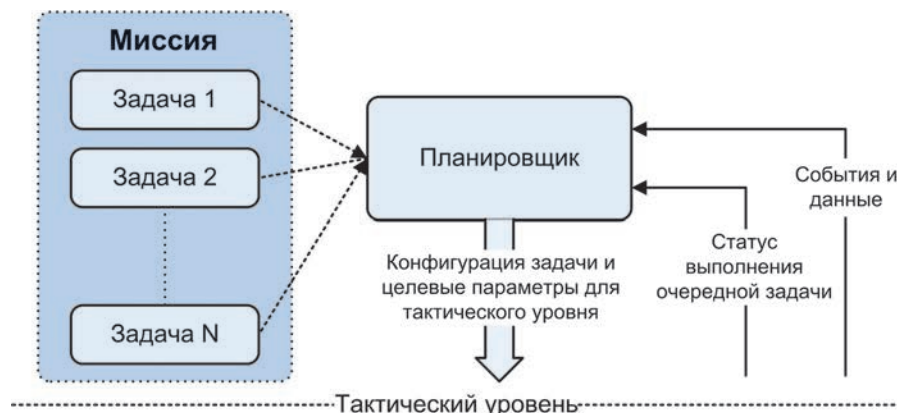


Рис. 7. Стратегический уровень системы

По умолчанию задача «Конец миссии» активизируется, когда больше нет активных задач – все задачи закончены (не обязательно выполнены) или нет условий для активизации. Эта задача необходима для спецификации каких-либо нестандартных условий или действий по окончанию миссии.

Стратегический уровень предназначен для организации выполнения миссии в рамках системы управления АНПА. Уровень включает резидентную часть (планировщик) и нерезидентную (миссия) (рис. 7).

В функции планировщика входит:

- выбор задачи, пригодной к выполнению (в порядке описания или с использованием каких-либо других критериев);
- определение для тактического уровня состава агентов выбранной задачи и инициирование ее выполнения на тактическом уровне;
- инициирование окончания миссии в случае отсутствия активных задач.

В случае использования декларативных миссий перепланирование происходит при завершении очередной задачи либо при изменении условий, позволяющих инициировать другую задачу.

При использовании императивных миссий функции планировщика вырождаются,

поскольку такая миссия состоит из одного агента-миссии, специально разработанного для решения конкретной задачи. Поэтому действия планировщика сводятся к загрузке такого агента в тактический уровень в качестве базового слоя с низким приоритетом.

4. Библиотека агентов для решения поисково-обследовательских задач

Для выполнения исследовательских задач (в частности, для задачи инспекции искусственных протяженных объектов) разработан набор агентов (рис. 8), обеспечивающих проведение полного цикла работ. Рассмотрим далее некоторые характерные задачи, решаемые с использованием элементов этой библиотеки.

4.1. Агенты для покрытия акваторий сетью галсов

Наиболее распространенными работами, выполняемыми в настоящее время с помощью АНПА, являются обзорно-поисковые. Такие работы производятся, как правило, путем площадной съемки выбранных участков донной поверхности (с использованием ГБО, профилографа, фотосистемы и другого оборудования) и последующе-

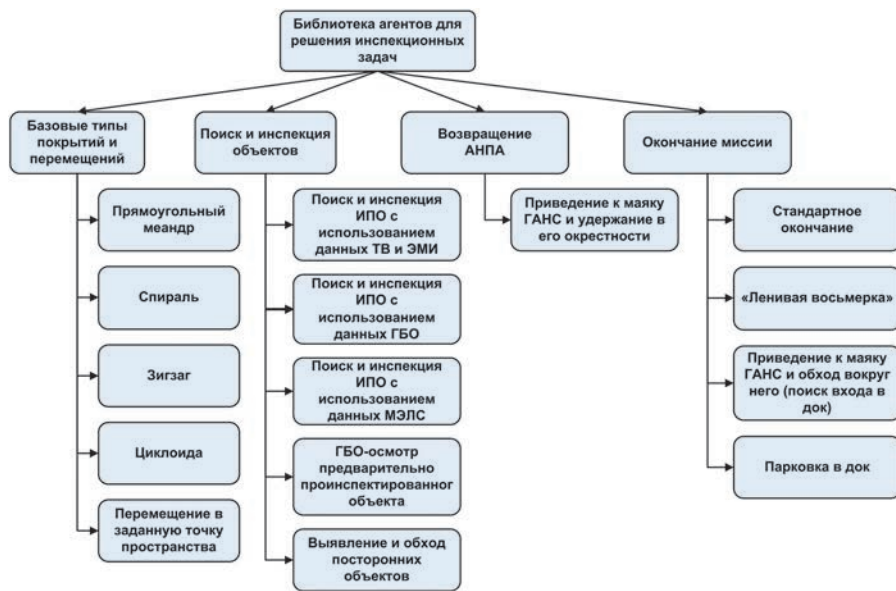


Рис. 8. Библиотека агентов тактического уровня

го дообследования обнаруженных потенциально интересных объектов. Таким образом, типичная миссия АНПА по обследованию акватории состоит из фрагментов площадного и точечного обследований. Обследовательские операции более сложны и предполагают согласованное функционирование нескольких агентов, обеспечивающих обзорную и обследовательскую части работ.

В обоих случаях для выполнения обзорной части операций

используются агенты, реализующие *базовые типы покрытий*: прямоугольный меандр, циклоиду, спираль, зигзаг. Характеристики этих траекторий достаточно подробно изложены в [20]. Целью работы агентов является покрытие района траекторией минимальной длины с минимальным количеством поворотов и старт-стопных режимов. Тип покрытия выбирается в зависимости от текущей цели миссии (покрытие обширного или точечного района, поиск

протяженного объекта), а параметры движения определяются автоматически, исходя из параметров района и характеристик используемой аппаратуры.

Районы большой площади обследуются, как правило, при помощи ГБО. Движение АНПА в этом случае задается как последовательность параллельных взаимобратных галсов, напоминающих *прямоугольный меандр*. Траектория движения в форме *прямоугольной удлиненной циклоиды* используется для досмотра точечных объектов (т.е. объектов, размеры которых сопоставимы с размерами АНПА и его радиусом циркуляции). Чаще всего координаты таких объектов выявляются в ходе площадных съемок, поэтому наличие предварительной информации позволяет говорить о досмотре, т.е. повторном и более детальном исследовании. Площадная фотосъемка более крупных районов осуществляется с использованием *сходящейся прямоугольной спирали Архимеда*. Для проведения поиска и последующей инспекции подводной коммуникации с использованием бортовых средств обнаружения (ГБО, ЭМИ, фотосистемы) применяется *зигзагообразная фигура*, напоминающая змейку. Указанные агенты успешно использовались при поиске затонувшего в Охотском море потенциально опасного объекта [21].

На рис. 9 в качестве примера комплексного использования различных вариантов покрытий приведена траектория движения АНПА при локализации группы точечных объектов.

4.2. Обследование искусственных протяженных объектов

К искусственным протяженным объектам принято относить кабели и трубопроводы.

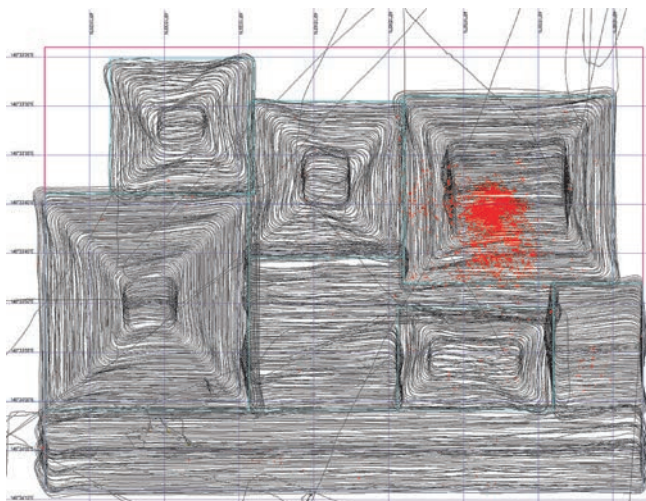


Рис. 9. Сплошное фотопокрывание нескольких районов прямоугольной формы и точечных объектов с использованием траекторий типа меандр, циклоида и спираль (красным цветом обозначены места наиболее вероятного расположения искомых объектов)

Цель работы обследовательских агентов, осуществляющих инспекцию ИПО, заключается в движении АНПА вдоль объекта с покрытием его по всей длине фото или ГБО-изображениями. Также в задачи инспектирования могут входить обнаружение и классификация посторонних объектов вблизи ИПО.

Детектирование и обследование протяженных объектов производятся на основе разнородной и неполной информации от бортовых сенсорных устройств (гидролокатора бокового обзора, фотосистемы, электромагнитного искателя, многолучевого эхолотатора). Для повышения вероятности обнаружения информация из различных источников объединяется в «модель среды» и обрабатывается совместно. «Модель среды» создается на основе информации от бортовой навигационной системы и данных от систем распознавания, получаемых на исполнительном уровне. «Модель» включает также оценку вероятности существования объекта с заданными координатами в текущий момент времени. Интегральная оценка местоположения и направления объекта не подвержена существенному влиянию сбойных данных от подсистем распознавания и отражает координаты ИПО, даже когда объект не детектируется [22].

Управление АНПА производится путем выработки целевого курса, который представляется в виде суммы направления инспектируемого объекта, угла пересечения с объектом и величины, стабилизирующей траекторию АНПА над объектом инспекции. При уменьшении интегральной оценки существования ИПО (потере контакта) АНПА переходит к осуществлению поисковой траектории, которая характеризуется как уве-

личением угла захода на объект, так и расширением границ зоны обследования. Таким образом, траектория аппарата представляет колебательное движение вдоль объекта инспекции. При этом амплитуда колебаний обратно пропорциональна вероятности наличия ИПО.

Наиболее подходящим акустическим средством обнаружения посторонних объектов вблизи ИПО является гидролокатор бокового обзора [23], который к тому же позволяет организовать выход АНПА к этим объектам. Идентификация на ГБО-снимках объектов с небольшими габаритами представляется достаточно непростой задачей. Ее решение зависит от многих внешних факторов: структуры дна в районе поиска, формы объекта, звукоотражающих свойств поверхности объекта, расположения на поверхности дна и др. В любом случае гарантировать достоверность принятого решения о принадлежности распознанного объекта к тому или иному классу не представляется возможным, поэтому необходимо визуальное дообследование объектов средствами телевизионной системы (ТВС).

Агент, реализующий дообследование, находится поочередно в двух состояниях. Во время первой (пассивной) фазы происходит обнаружение объектов на эхограмме ГБО, которое включает этапы: предварительная обработка и фильтрация изображения, выделение границ объектов, выделение объектов и подсчет их количества (кластеризация), определение параметров и классификация объектов.

Выход к обнаруженным объектам во время второй (активной) фазы заключается в прокладке оптимального маршрута между объектами внутри группы. Точкой старта и окончания маршрута является текущее местоположение АНПА. Выбор оптимальной траектории между заданным количеством точек представляет собой классическую задачу коммивояжера, которая может быть решена различными способами.

В качестве примера использования нескольких агентов обследования одновременно рассмотрим схему поведения АНПА, использующуюся при инспекции ИПО (рис. 10) и включающую этапы:

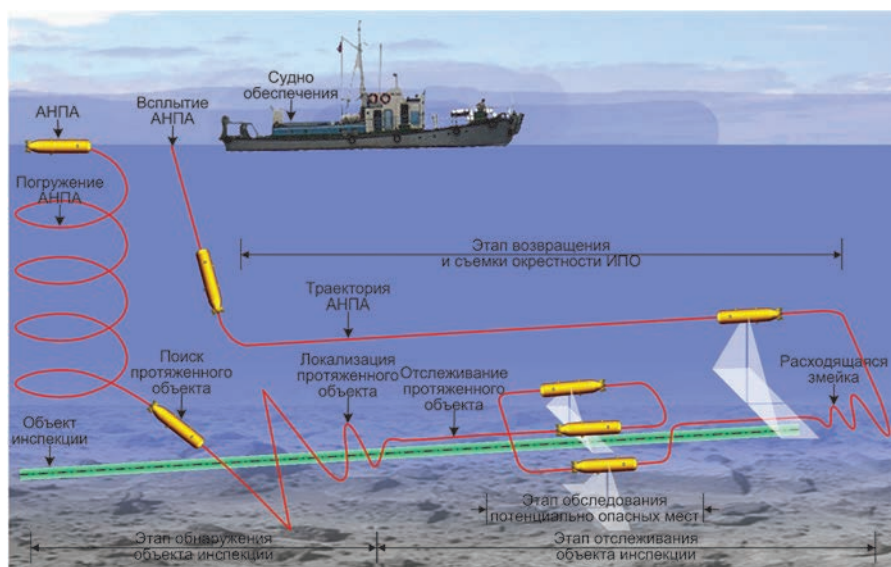


Рис. 10. Схема поведения АНПА при инспекции ИПО

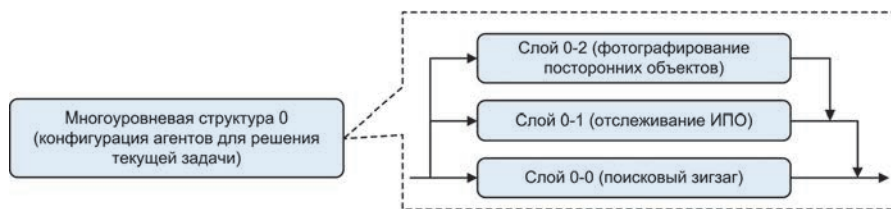


Рис. 11. Многоуровневая структура, используемая для инспекции ИПО

- погружения АНПА и поиска объекта;
- обнаружения и отслеживания объекта;
- обнаружения и фотографирования посторонних объектов вблизи ИПО.

Для реализации такого поведения формируется структура тактического уровня (рис. 11), содержащая три слоя управления:

- осуществление поисковой траектории (меандр или зигзаг);
- обследование ИПО;
- обследование посторонних объектов вблизи ИПО.

Первоначально активизирован низкоприоритетный агент, реализующий поисковую траекторию (в данном случае, зигзаг). При обнаружении объекта и получении сигнала от системы распознавания активизируется слой, реализующий поведение АНПА при обследовании объекта, а выполнение поисковой траектории при этом подавляется.

Третий слой служит для обнаружения и дообследования посторонних объектов вблизи ИПО. Как говорилось выше, его работа включает пассивную и активную фазы (обследование обнаруженных «подозрительных» объектов). На время ак-

тивной фазы деятельность агента отслеживания подавляется и возобновляется с ее окончанием (продолжение инспекции объекта).

Пример траектории, иллюстрирующий работу суперпозиции из двух агентов (поисковый зигзаг и отслеживание объекта с помощью фотосистемы), можно найти в [1]. При обследовании реального кабеля в Уссурийском заливе Японского моря [22] в многоуровневых структурах использовались агенты, реализующие прямое и возвратное движение (рис. 10, верхняя траектория), во время которого осуществлялось обследование объекта средствами ГБО.

4.3. Приведение и стыковка АНПА с подводной доковой станцией

Заключительным этапом любой миссии АНПА является *возвращение к обеспечивающему судну или в подводную доковую станцию (ПДС)*. Последние могут использоваться для обеспечения длительного пребывания робота под водой [1].

Процедура автоматического сближения АНПА с доковой станцией включает две стадии [24]. На первом этапе АНПА формирует траекторию к ПДС (включающую маневрирование вблизи станции), определяя и уточняя пеленг на приводной маяк на основе периодически измеряемых дистанций до маяка (откликов) [25].

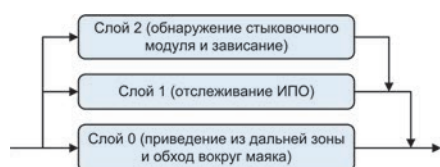


Рис. 12. Управляющая структура для входа в док

Основная задача второго (прецизионного) этапа состоит в подходе к ПДС с заданного направления и обеспечении необходимой взаимной ориентации АНПА и стыковочного устройства, расположенного на ПДС. Для этого АНПА совершает круговой маневр вокруг ПДС, обнаруживает на дне контрастную маркерную линию, вдоль нее подходит к ПДС и зависает над стыковочным узлом. Обход вокруг маяка осуществляется в направлении, перпендикулярном пеленгу.

Процедура автоматического *возвращения к обеспечивающему судну* может рассматриваться как отдельная задача, заключающаяся в приведении АНПА из дальней зоны.

Для решения данной задачи формируется структура из одного агента (для случая обычного приведения к судну) или трех агентов (для случая докования). В последнем случае используются агенты (рис. 12):

- приведение из дальней зоны и поиск входа в доковую станцию на основе обнаружения направляющей линии;
- отслеживание обнаруженной линии;
- остановка и зависание над стыковочным узлом.

После попадания АНПА в окрестность маяка происходит либо удержание его вблизи маяка (для случая приведения к обеспечивающему судну), либо обход вокруг маяка для поиска направляющей линии, ведущей в док (рис. 13). Вход в док [24] производится с использованием агента, обнаруживающего контрастную линию и осуществляющего движение вдоль нее. Далее при обнаружении стенок дока, маркера на фотоизображении или совокупности этих объектов активизируется агент, отвечающий за стабилизацию

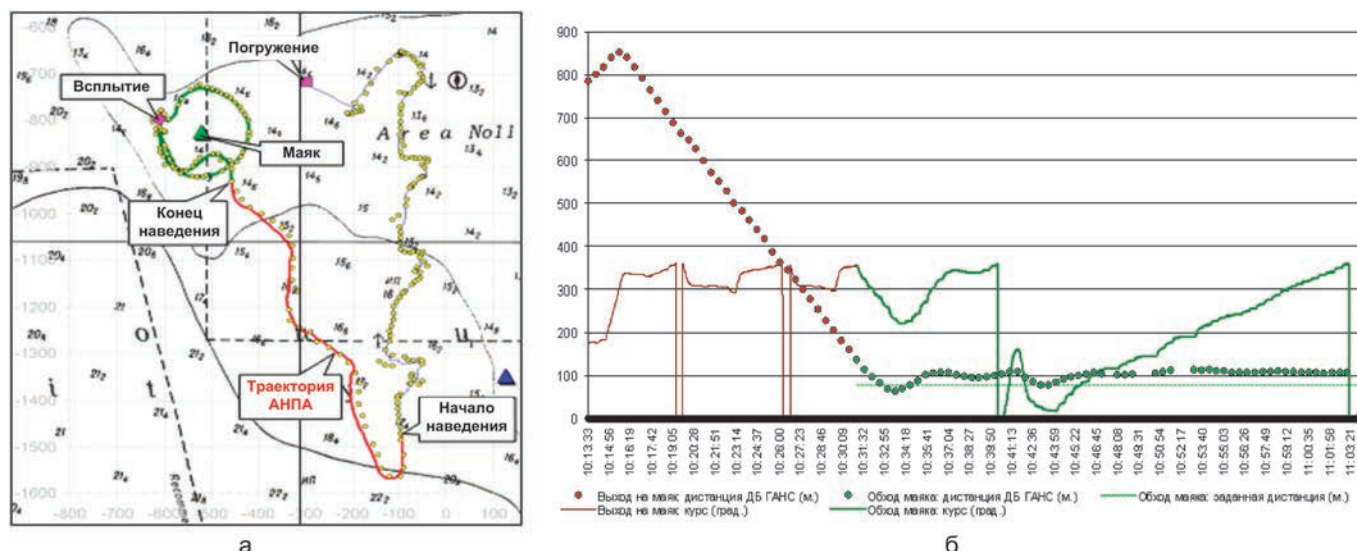


Рис. 13. Приведение АНПА МТ-98 [22] к макету дока и обход вокруг него: а – движение в горизонтальной плоскости; б – график изменения курса АНПА и дистанции до маяка

АНПА внутри дока и за посадку на ложементы.

Агенты автоматического приведения к обеспечивающему судну успешно использовались при работе АНПА «Клаверин-1Р» в августе 2007 года в Северном Ледовитом океане [26]. В рамках комплексной экспедиции «Арктика-2007» АНПА использовался с борта атомного ледокола «Россия» для изучения характеристик дна в условиях сплошного ледового покрытия. К особенностям подледных работ следует отнести необходимость проведения спускоподъемных операций АНПА через полыню, а также дрейф льда (и полыни) в районе работ. В этих условиях особое

значение имеет возможность автоматического возвращения АНПА к обеспечивающему судну после окончания миссии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный поведенческий подход к построению архитектуры ИУС АНПА развивается в ИПМТ ДВО РАН и в той или иной мере реализован в различных АНПА. Его эффективность подтверждена результатами морских испытаний и опытной эксплуатации более десяти образцов аппаратов при решении различных задач (поиск и отслеживание протяженных объектов, работы в подледных условиях на хребте

Ломоносова в Северном Ледовитом океане, различные поисковые операции, приведение и докование АНПА).

В настоящее время развитие архитектуры ИУС идет в нескольких направлениях:

- осуществляется переход на новую программную платформу [27], что позволит эффективнее использовать преимущества поведенческого подхода;
- совершенствуется библиотека агентов тактического уровня для решения с помощью АНПА ряда новых задач;
- совершенствуется способ представления миссии для возможности освоения АНПА более широким кругом потенциальных пользователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 398 с.
2. Connolly M. Successes in Combining Testing with Training in the Modular Mission Package (MMP) Program // Unmanned Maritime Vehicle (UMV) Test & Evaluation Conference. 2005.
3. Ньюэлл А., Саймон Г. Информатика как эмпирическое исследование // Лекции лауреатов премии Тьюринга. М.: Мир, 1985.
4. Fikes R.E. and Nilsson N. STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving // Artificial Intelligence. 1971. Vol. 2, No. 3/4. P. 189–208.
5. Albus J.S., Proctor F.G. A Reference Model Architecture for Intelligent Hybrid Control Systems // IFAC'96. USA, San Francisco.
6. Arkin R. Behavior-Based Robotics. Cambridge, MA: MIT Press, 1998. 505 p.
7. Brooks R.A. Elephants don't play chess // Robotics and Autonomous Systems. 1990. Vol. 6. P. 3–15.

8. Rosenblatt J. DAMN: A Distributed Architecture for Mobile Navigation // *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. 1997. Vol. 9, No. 2/3. P. 339–360.
9. Платонов А. К., Кирильченко А. А., Колганов М. А. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы: препр. / ИПМ им. М. В. Келдыша. М.: РАН, 2001.
10. Per Espen Hagen, Шивинд Хегренжс, Бюрн Ялвинг, Шивинд Мидтгаард, Мартин Вииг и Ове Кент Хеген. Making AUVs Truly Autonomous // *Underwater Vehicles*. 2009. P. 129–152. URL: http://www.intechopen.com/books/underwater_vehicles.
11. Carreras M., Batlle J., Ridao P., Roberts G. An overview on behaviour-based methods for AUV control // *Proc. of MCMC 2000, 5th IFAC Conf. on Manoeuvring and Control of Marine Crafts*. Denmark, Aalborg, 2000.
12. Гаврилов А. В., Новицкая Ю. В. Гибридные интеллектуальные системы // *Proc. of The Int. Conf. «Information systems and technologies»*. Novosibirsk, 2003. Vol. 3. P. 116–122.
13. Ferguson I. A. Integrated Control and Coordinated Behaviour: A case for Agent Models // *Lecture Notes in Computer Science*. 1995. Vol. 890. P. 203–218.
14. Byrnes R., Kwak S., McGhee R., Healey A., Nelson M. Rational Behaviour Model: An Implemented Tri-Level Multilingual Software Architecture for Control of Autonomous Vehicles // *Proc. 8th Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology*. Durham, New Hampshire, 1992. P. 160–179.
15. Федосов Е. А., Красовский А. А., Попов Е. А. и др. Машиностроение: энциклопедия. Т. 1–4: Автоматическое управление: Теория / под ред Е. А. Федосова. М.: Машиностроение, 2000. 688 с.
16. Davis D. T., Becker W., Brutzman D. P. Facilitation of Autonomous Vehicle Coordination through an XML-based Vehicle-independent Control Architecture // *Proc. of the 16th Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST09)*. New Hampshire, 2009.
17. Duarte C., Martel G., Buzzel C. et al. A Common Control Language to Support Multiple Cooperating AUVs // *Proc. of the 14th Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST05)*. New Hampshire, 2005.
18. Giger G., Kandemir M., Dzielski J. Graphical Mission Specification and Partitioning for Unmanned Underwater Vehicles // *Journal of Software (JSW)*. 2008. Vol. 3, No. 7. P. 42–54.
19. Голенков Е. А., Одякова Д. С., Тарасов Г. В., Харитонов Д. И. Двухуровневое формирование заданий для автономных подводных роботов // *Подводные исследования и робототехника*. 2010. № 1(9). С. 14–21.
20. Багницкий А. В., Инзарцев А. В. Автоматизация подготовки миссии для автономного необитаемого подводного аппарата в задачах обследования акваторий // *Подводные исследования и робототехника*. 2010. № 2(10). С. 17–24.
21. Кузнецов О. Л., Матвиенко Ю. В., Рылов Н. И., Наумов Л. А. Опыт широкомасштабного поиска подводного потенциально опасного объекта в Охотском море // *Подводные исследования и робототехника*. 2010. № 2(10). С. 36–43.
22. Inzartsev A., Pavin A. AUV Application for Inspection of Underwater Communications // *Underwater Vehicles* / Ed. by A. V. Inzartsev. Vienna, 2009. P. 215–234. URL: http://www.intechopen.com/books/underwater_vehicles.
23. Золотарев В. В., Золотарев А. В., Федотов Д. Б., Ходоренко М. С. Обзорно-поисковые гидролокаторы ИПМТ и их применение в составе подводных роботов // *Труды VIII междунар. конф. «Современные методы и средства океанологических исследований»*. М: ИО РАН, 2003. С. 254–256.
24. Inzartsev A., Matvienko Yu., Pavin A., Vaulin Yu., Scherbatyuk A. Investigation of Autonomous Docking System Elements for Long Term AUV // *Proc. of the OCEANS 2005 MTS/IEEE Conference*. USA, Washington, D.C., 2005.
25. Pavin A., Inzartsev A., Matvienko Yu. Experience of AUV Automatic Homing to Hydroacoustic Transponder // *Proc. of UT2009 Symp. China, Wuxi*, 2009. P. 201–206.
26. Инзарцев А. В., Каморный А. В., Львов О. Ю., Матвиенко Ю. В., Рылов Н. И. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // *Подводные исследования и робототехника*. 2007. № 2(4). С. 5–14.
27. Инзарцев А. В., Боровик А. И., Баль Н. В. Разработка программного обеспечения системы управления АНПА на базе модифицированной платформы Player // *Материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Перспективные системы и задачи управления»*. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. С. 380–390.

