

В.В. ГРИБОВА, Е.А. ШАЛФЕЕВА, В.Ф. ФИЛАРЕТОВ, А.В. ЗУЕВ,
Д.А. ЮХИМЕЦ
**МЕТОД ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ МИССИЙ
АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ**

Грибова В.В., Шалфеева Е.А., Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Юхимец Д.А. Метод интеллектуального планирования миссий автономных подводных аппаратов.

Аннотация. Создание полностью автономных необитаемых подводных аппаратов и комплексов, способных выполнять различные исследовательские и технологические операции в условиях неопределенности, является актуальной задачей. Ключевой проблемой является автоматическая коррекция миссий в реальном времени на основе данных от бортовых систем. Целью данной работы является разработка метода интеллектуального планирования миссий на стратегическом уровне управления автономными подводными робототехническими комплексами, обеспечивающего автоматическое формирование адаптивных планов и их преобразование в исполнительные команды тактического уровня для работы в изменяющихся условиях среды. В статье авторами определены принципы разработки интеллектуального планировщика миссий автономных подводных робототехнических комплексов (АПРК) на стратегическом уровне и менеджера миссий для управления миссией на тактическом уровне с формированием конкретных заданий исполнителям. Разработана формальная модель планирования миссий через множество линейных участков с предусловиями и постусловиями. Ключевым аспектом предложенного решения является использование онтологического подхода для стандартизации описания миссий и обеспечения их программной интерпретации. Создана специализированная среда разработки миссий на облачной платформе IASaaS, позволяющая экспертам формировать и адаптировать планы миссий без углубления в технические детали. Разработан комплекс инструментальных средств с модульной архитектурой, обеспечивающий масштабируемость и адаптацию решения для различных классов АПРК и типов миссий. Результаты апробации показали, что предложенное решение позволяет формировать гибкие планы, учитывающие разнообразие ситуаций, и автоматически выбирать последовательности команд в зависимости от поступающих данных. Полученные результаты открывают новые возможности для создания полностью автономных подводных комплексов, способных выполнять сложные исследовательские и технологические операции без постоянного контроля оператора. Дальнейшие исследования направлены на совершенствование алгоритмов менеджера миссий, а также на интеграцию планировщика с другими компонентами бортового обеспечения.

Ключевые слова: автономный подводный аппарат, робототехнический комплекс, интеллектуальное планирование, миссия, неопределённость.

1. Введение. Важным направлением развития в области применения автономных необитаемых подводных аппаратов является их оснащение новым оборудованием и усложнение выполняемых ими задач [1 – 3].

Одной из ключевых проблем в создании полностью автономных подводных робототехнических комплексов (АПРК) является необходимость автоматического формирования и коррекции

в реальном времени действий роботов на основе поставленной общей цели [4–7] и информации от бортовых систем об изменяющихся условиях. Для решения этой проблемы при работе в сложных и неопределенных условиях рабочей среды необходима разработка информационно-управляющих систем (ИУС) нового поколения – с элементами искусственного интеллекта.

ИУС современных роботов имеют многоуровневую структуру [8]: поступающая в нее информация относится к разным уровням «иерархии». Предполагается, что если ИУС имеет *«стратегический»* (высший) *уровень* управления автономным аппаратом или роботом, то он должен отвечать за модельные представление робота об окружающей рабочей среде и за принятие решений об общем плане выполнения полученных заданий с учетом априорных и накопленных знаний об этой среде, конфигурации и состоянии бортового оборудования. При этом общий план действий на этом уровне за счет использования интеллектуального планировщика миссий (ИПМ) должен расчленяться на конкретные элементарные операции, с выбором их последовательности и параметров выполнения. Следующий – *«тактический»* *уровень* ИУС должен преобразовывать выбранные элементарные операции в желаемые позиции аппарата или, например, его манипулятора, в скорости или усилиях, которые они должны развивать. Это позволяет сформировать требуемые законы согласованного изменения движения АПРК. Для отработки этих программных законов *исполнительный»* *уровень* управления вырабатывает конкретные воздействия на соответствующие движители и приводы манипулятора с учетом обратных связей, подающих соответствующие сигналы от датчиков внутренней информации о состоянии исполнительной системы АПРК.

В работе [9] рассмотрены вопросы создания архитектуры интеллектуальной многоагентной системы планирования и формирования заданий для автономных необитаемых подводных аппаратов, в основу которой положен алгоритм планирования Graphplan [10]. Особенностью созданной системы является использование базы знаний поведения автономных аппаратов при решении типовых задач в сочетании с сетевой организацией взаимодействия интеллектуальных агентов планирования. При этом авторами разработан механизм опосредованной централизованной коммуникации агентов, реализуемый на принципах «доски объявлений». Полученный механизм позволяет разделить основной процесс поиска на непосредственно процессы решений и управления,

взаимодействия между которыми совершаются посредством механизма взаимодействия агентов.

В качестве серьезного недостатка описанной интеллектуальной системы планирования и формирования заданий для подводных аппаратов необходимо отметить отсутствие эффективного механизма формирования базы знаний экспертами предметной области, а также сложность автономной реализации решателя интеллектуальной системы на борту. Кроме того, предложенный метод не учитывает возможность установки сложного дополнительного оборудования, в частности, многозвенных манипуляторов.

Разработан метод планирования миссии для группы подводных аппаратов [11], который предполагает оптимальное распределение задач между ними в соответствии с их характеристиками (бортовым оборудованием и автономностью). Указанный метод основан на модификации алгоритма RRT (Rapidly-exploring Random Tree Star), который позволяет спланировать маршрут каждого робота в зависимости от заданных показателей эффективности и особенностей окружающей среды (препятствия, течения) так, чтобы гарантировать выполнение всех целей, поставленных в миссии. Однако в качестве целей миссии может быть сформировано только достижение заданных целевых маршрутных точек, что не позволяет использовать описанный метод для планирования миссий с более сложными целями, которые предполагают выполнение технологических операций, поиск и детальное обследование заранее неизвестных объектов интереса.

В работе [12] предлагается метод построения планировщика миссий для группы беспилотных летательных аппаратов. Указанный планировщик состоит из двух основных компонентов: генератор миссий, который формирует возможные варианты действий для каждого аппарата, и модуль помощника, который оценивает сгенерированные планы действий с точки зрения достижимости целей, эффективности и затрат ресурсов. Однако генерация новых планов действий и выбор плана на запуск обеспечивается непосредственно оператором, на которого возлагаются интеллектуальные функции планировщика. При этом отсутствие высокоскоростных каналов связи не позволяет эффективно включить оператора в процесс перепланирования миссии, так как он не получит необходимого объема данных для принятия решений.

Методы автоматического планирования миссий в настоящее время наиболее актуальны в аэрокосмической области при создании автономных космических аппаратов и роверов [13], предназначенных для исследования поверхности других планет. При их создании

основным требованием является возможность перепланирования миссии в зависимости от изменения текущей обстановки без вмешательства оператора. При этом само планирование в большинстве случаев сводится только к планированию маршрутов ровера на основе статистического анализа возможных ситуаций и выбора оптимального варианта. Кроме того, запуск новой миссии на исполнение часто требует прямого подтверждения оператора.

В работе [14] описана архитектура информационно-управляющей системы необитаемого аппарата с интеллектуальным алгоритмом принятия решений, обеспечивающая автоматическое выполнение исследовательских миссий в подводной среде с неизвестными препятствиями. Предложенный алгоритм принятия решений учитывает информацию об окружающей среде, параметрах заданной миссии и составе бортового оборудования. При этом архитектура менеджера, управляющего миссией, реализуется в реальном времени с использованием сетей Петри.

Анализ представленной работы показал, что предложенный алгоритм принятия решений не предполагает автоматическое выполнение комплексных миссий для поиска заданных объектов работы и выполнения различных манипуляционных операций.

Проблемы реализации «тактического» и «исполнительного» уровней ИУС АПРК в большинстве уже практически решены [3, 4, 15, 16]. При этом исследования по созданию ИУС с элементами искусственного интеллекта для различных роботов активно развиваются и к настоящему времени уже создано множество отдельных довольно эффективных подходов: для разработки алгоритмов автономной навигации, для решения SLAM задач (одновременная локализация и картографирование – Simultaneous Localization and Mapping) [17 – 19], классификации объектов и оптимизации планирования маршрутов в сложной среде [20 – 22], алгоритмы распределения задач между группами роботов [23, 24], анализа информации, непрерывно получаемой от датчиков в реальном времени [25, 26], для диагностики блоков и устройств [27] и др.

Созданные решения уже позволяют выполнять довольно сложные задачи в подводной среде, однако полная автономность и интеллектуальность АПРК остается еще не достигнутой из-за большой сложности и неопределенности подводной среды, меняющихся условий функционирования этих АПРК, большого разнообразия решаемых ими задач, необходимости принятия решений в условиях неполных данных или неожиданных событий. Отдельно стоит отметить технические особенности, связанные с ограниченными

вычислительными ресурсами и отсутствием большого количества данных для обучения в отличие от других типов роботизированных устройств.

Указанные факторы требуют создания новых подходов, направленных на развитие интеллектуальных средств управления и ИУС АПРК на стратегическом уровне.

Целью данной работы является разработка метода интеллектуального планирования миссий на стратегическом уровне управления автономными подводными робототехническими комплексами, обеспечивающего автоматическое формирование адаптивных планов и их преобразование в исполнительные команды тактического уровня для работы в изменяющихся условиях среды.

2. Теоретические аспекты планирования миссии в условиях неопределенности. Решение сложных интеллектуальных задач обычно предполагает последовательное выполнение ряда этапов. Для задачи планирования этапами являются:

- формулировка четко определенной цели;
- разработка плана миссии (пошаговой стратегии достижения цели);
- реализация/выполнение действий, непосредственно направленных на ее достижение.

В контексте АПРК цели определяются спецификой их применения, включая научные исследования, военные операции, поисково-спасательные миссии, экологический мониторинг и технологическое использование. При этом возможности такого применения вытекают из (или ограничиваются) множеством известных команд АПРК.

При разработке планов миссий и определении действий АПРК, направленных на достижение целей, необходимо учитывать множество факторов, связанных с возможными сценариями развития событий в процессе выполнения задачи, характеристики операционной зоны, а также технические параметры самого АПРК.

Особое внимание следует уделить последовательной передаче команд через управляющую систему АПРК, что является критически важной особенностью реализации операций. Поэтому при разработке плана миссии требуется определить *потенциальное множество линейных планов действий*, выбор из которого будет происходить, исходя из текущей обстановки.

Обозначим четко определенную цель (желаемое, достигаемое целевое состояние) как s_{goal} , множество известных *действий-команд* – как $\{a_j\}$, *предусловие* j -го действия (условие на состояние, в котором

его можно применять) и его *постусловие* (условие на состояние, возникающее после выполнения действия) – как $\langle \varphi_{pred}^j, \varphi_{post}^j \rangle$ соответственно. Тогда s_{goal} – это одно из состояний процесса-сценария, другое очевидное состояние – начальное, s_0 . При этом каждое состояние (начальное, целевое или состояние, возникающее после выполнения одного из действий) может определяться набором аспектов $\{asp^i\}$: местоположение относительно других сущностей, собственная конфигурация АПРК, свойства его «частей», время, полученные сведения и др. В некоторых простых сценариях или заданиях все состояния могут быть перечислены ($s_0, s_1, s_2, \dots, s_M, s_{goal} \in S$) и именованы.

Необходимо учитывать и такую особенность реализации/выполнения *действий-команд*, как их передача на АПРК (через управляющую систему АПРК) строго последовательно. При этом выполняться они могут параллельно, т.к. исполнители – части единого робототехнического комплекса.

Введем термин *линейный участок* (последовательная группа действий) – это *действия-команды*, выстроенные друг за другом $\langle a_1, a_2, \dots, a_T \rangle$, которые передаются строго по очереди. Тогда помимо предусловий и постусловий $\langle \varphi_{pred}^j, \varphi_{post}^j \rangle$ действий a_j следует обращаться и к предусловиям/постусловиям *групп действий* $d_{jk}: \langle \varphi_{pred}^{jk}, \varphi_{post}^{jk} \rangle$.

При разработке плана типовой миссии требуется определить потенциальное множество таких *групп действий-команд* – линейных участков. На этапе исполнения выбор *групп действий-команд* из этого множества должен производиться, исходя из некоторых условий, обстановки (текущего состояния).

Принимая для простоты вариант, когда все состояния могут быть перечислены, постановку *задачи планирования* абстрактной (типовой) миссии можно выразить так.

Дано:

$$s_0, s_{goal} \{a_j = \langle \varphi_{pred}^j, \varphi_{post}^j \rangle\}.$$

Найти:

потенциальное множество *линейных участков* планов (*групп действий-команд*) $\{\langle d_1, \dots, d_n \rangle\}$, $d_k = \langle a_{ik}, \dots, a_{mk} \rangle$ с определенными $\langle \varphi_{pred}^k, \varphi_{post}^k \rangle$ для каждого $d_k \in D$ и условий их применения – правил $\{s_{jk} \rightarrow d_{jk}\}$, обеспечивающих пошаговую, поэтапную стратегию достижения цели. Т.е. обеспечивается существование не менее одной цепочки от s_0 к s_{goal} : $\langle s_0 = \varphi_{pred}^1, s_1 = \varphi_{post}^1 \rangle, \langle s_1 = \varphi_{pred}^2, s_2 =$

$\varphi_{post}^3, \dots, (s_{k-1} = \varphi_{pred}^{1k}, s_{goal} = \varphi_{post}^{k+1})$ (т.е. в такой цепочке постусловие каждой *группы* совпадает с предусловием другой *группы* в этой цепочке или с целью).

Это множество пар, сопоставляющих условию применения группу действий $\{s_{jk} \rightarrow d_{jk}\}$, является базой знаний о возможностях и вариантах реагирования АПРК на разные ситуации [9, 10] при выполнении типовой задачи.

Существование множества цепочек от s_0 к s_{goal} (в плане типовой миссии) дает шанс гарантировать выполнение всех целей, поставленных в миссии [11], если не будет препятствий (конкретных и общего характера), предусмотренных планом.

Отметим, что в типовом плане могут быть заложены варианты оптимизации работ или маршрута с учетом многообразия аспектов изменяющейся обстановки, особенно при рассмотрении спектра возможных результатов выполнения (постусловий) отдельных действий в составе группы. По результатам команд могут выработываться сообщения о событиях $\{ev_i\}$.

В общем случае *действие-команда* a_k имеет параметры выполнения p_{k1}, \dots, p_{kn} . Некоторым параметрам могут быть назначены значения на уровне типового задания (например, минимальная скорость), некоторые могут быть наделены значениями при конкретизации места работы или исполняющих устройств (например, высота над поверхностью при поиске гидролокатором), некоторые – смогут получить значения в реальной обстановке в зависимости от достигнутых успехов или проблем (например, оценка оставшегося заряда). С некоторыми командами могут быть связаны сообщения о событиях с параметрами $ev_i(p_1, \dots, p_{kn})$, например, сообщение о найденном объекте и его координатах.

Правило $\{s_k \rightarrow d_k\}$ должно рассматриваться детально. Левая часть правила описывает условия по разным аспектам состояния процесса, что может быть выражено через события (оповещения или сигналы), измерения или вычисления. Состояние в текущий момент t есть набор свершившихся событий или значений их параметров и текущие значения свойств, атрибутов, конфигураций $s_k = \{ev_i(t, [p_{1l}, \dots, p_{im}]) | asp_j(t)\}^i$. Правая часть правила может требовать применения вычислительных функций для всех или некоторых параметров команд из $d_k: a_{k1}(p_{1l}, \dots, p_{1n}), \dots, a_{kl}(p_{1l}, \dots, p_{1m})$. Группа команд есть последовательность команд с возможностью их итеративного выполнения.

При этом $asp_j(t)$ имеет свою (j -ую) область возможных значений, например, диапазон возможной скорости движения, а любой параметр p_j может $\in \{asp^{i,t}\}$, например, скорость, с которой надо приблизиться к объекту для захвата, а для получения значения параметра команды может потребоваться применение функции или операции из $\{f_1, f_2, \dots, f_Q\}$, например, для расчета расстояния до указанной точки пространства. Для нетривиальных вычислений и для удобства связывания параметров команд с актуальными значениями могут применяться переменные $V = \{v_1, v_2, \dots, v_P\}, f_q: V_n \rightarrow V$. Поэтому функции или операции для вычисления актуальных величин являются важной частью адаптируемых планов.

Планирование абстрактной миссии как набора правил для множества линейных участков представляет собой этап, выполняемый человеком-оператором и обладающий наибольшей интеллектуальной сложностью. Метод данного планирования заключается в декомпозиции сценария достижения цели на необходимый и достаточный набор правил выбора действий (подзадач), зависящих от развития ситуации в реальных условиях. Информационное обеспечение процесса планирования ограничивается потоком событий, включающим: сообщения о возникновении проблемных ситуаций; данные от систем технического зрения и сенсоров; сигналы успешного выполнения командных последовательностей. Указанные классы событий формируют предусловия для активации соответствующих правил выбора действий, обеспечивая тем самым адаптивность плана к изменяющимся условиям операционной среды.

При этом у эксперта предметной области есть возможность предусмотреть типичные особенности окружающей среды (препятствия, течения) и описать типичные реакции на них [11]. В качестве целей миссии может быть сформировано не только достижение заданных целевых маршрутных точек, а более сложные цели, включая выполнение технологических операций, поиск и детальное обследование объектов интереса, в том числе заранее неизвестных, выполнение исследовательских миссий с неизвестными препятствиями, выполнение комплексных миссий, предполагающих поиск заданных объектов и выполнение различных манипуляционных операций [14].

На современном этапе *планирование абстрактной миссии* может быть поддержано подсказками и контролем полноты всех возможных состояний и непротиворечивости правил.

Общий, типовой план миссии адаптируется к реальному выполнению задачи (в смысле физического использования аппарата

для очередного достижения типовой цели) через задание специфических характеристик АПРК, особенностей территорий, на которых они выполняются, прочих объектов и субъектов миссии (которые содержатся в s_0 и s_{goal}).

Этап конкретизации (адаптирования s_0 и s_{goal} к s'_0 и s'_{goal}) позволяет сформировать вариант плана типовой задачи с учетом заданных показателей эффективности [11].

Конкретизация может быть поддержана оценением плана действий с точки зрения достижимости целей, эффективности и затрат ресурсов [12].

Задачу реализации (т.е. выбора действий для выполнения) можно выразить так:

Дано:

момент t ,

$\{ev_i(t, p_{1l}, \dots, p_{im})\}$,

$\{asp_j(t)\}$;

база знаний поведения АПРК $\{s_k \rightarrow d_k\}$ (с предвычисленными значениями тех параметров, которые зависели от s'_0 и s'_{goal}).

Найти:

очередной участок плана $d_k = \langle a_{ik}, \dots, a_{mk} \rangle$, верный относительно базы знаний (в предположении, что в базе для каждой комбинации $\{s_{ik}\}$, $s_{ik} = ev_i | asp_{ik}$ есть одно правило $s_j \rightarrow d_j$).

Этот этап может быть поручен программному исполнителю, когда уже построена пошаговая стратегия достижения цели. Программа-супервизор будет использовать базу знаний при принятии решения о выборе очередного участка линейного плана в конкретной ситуации.

3. Идея разделения планирования типового (шаблонного) и уникального сценария миссии. Планы миссий обладают свойством повторного использования. С одной стороны, для разных существующих (и определяемых) целей очевидны однотипные действия и их последовательности/совокупности.

С другой стороны, для одной цели могут сложиться разные условия выполнения, более того, могут формулироваться заведомо универсальные цели для их отработки в разных местах и временах. Это связано с идеей адаптировать разработанный план миссии к выполнению различных задач (конкретным робототехническим комплексом для очередного достижения типовой цели). Каждая такая конкретная миссия уточняет общий план миссии через задание специфических характеристик АПРК, особенностей территорий, на которых они выполняются, прочих объектов и субъектов миссии.

Метод декомпозиции сценария достижения цели на набор правил выбора действий предполагает наличие формализованного языка и средств для структурированного описания полного стратегического плана выполнения миссии. Данный подход учитывает ограниченность информации о состоянии процесса, предоставляет механизмы для вычисления динамически изменяемых параметров и обеспечивает точное преобразование в команды исполнительного уровня с параметрами.

В соответствии с вышеприведенными постановками задачи важны:

- язык и средство универсального планирования миссии экспертами предметной области, которые бы обеспечивали и облегчали создание и редактирование планов миссий с учетом специфики возникающих задач и условий их выполнения,
- метод и средство конкретизации универсального плана к специфике объектов и субъектов миссии и условий выполнения,
- метод и средство доведения до исполнителя (или алгоритма) локального выбора команд и других действий конкретного плана, а также их конкретизации путем назначения текущих значений параметрам.

Высокоуровневое планирование миссии в соответствии с описанием задания с учетом ресурсов АПРК, работоспособности его компонентов и внешних условий принято относить к стратегическому уровню (информационно-управляющей системы). Локальное планирование, которое адаптирует глобальные задачи к конкретным условиям работы отдельного устройства, принято относить к тактическому уровню; это планирование действий для текущей ситуации в рамках типовой запланированной миссии.

На основании изложенного предлагается общий подход к разработке системы планирования миссий, который отделяет работу тактического уровня от стратегического так, чтобы каждый вид планирования выполнялся в своих условиях, но с требуемым соответствием друг другу. Решено структурировать и стандартизировать описания миссий обоих уровней, создав для этого единую онтологию планирования миссий АПРК.

Использование онтологического подхода означает:

- 1) предоставление человеку семантического шаблона для формирования плана стратегического уровня, использование справочников и каталогов, систематизирующих свойства и номенклатуру сущностей этой предметной области;

2) обеспечение максимального соответствия при переводе конкретизируемого плана в семантический шаблон тактического уровня;

3) программную интерпретируемость плана тактического уровня (универсальным обработчиком миссий на борту).

Для описания всех составных частей планов предложены семантические шаблоны, которые в свою очередь связываются друг с другом отношениями вложенности, чередования и причинности.

Для исходного состояния s_0 – это узел «Исходные данные задания», содержащий набор узлов «параметр»;

для ожидаемых состояний s^{jk} и s_{goal} – узлы «конфигурация оборудования» и «Условия», внутри которого узлы «событие», «исключение» и узел «Значения переменных и состояние» с соответствующими внутренностями для ограничения диапазонов значений или их вычислений через функции или операции. Для действий $d_k = \langle a_{ik}, \dots, a_{mk} \rangle$, приводящих к смене состояний, – узлы «Присваивание значения», «Команда» (с «параметрами») и конструктор итераций (повторений), связывающий параметр некоторой «Команды» внутри с элементами из «конечное множество для параметра цикла».

Семантические шаблоны стратегического уровня в настоящее время являются основой создания специализированной среды разработки на онтологических платформах.

В рамках идеи разделения средств универсального планирования миссии от средств локального планирования действий в текущей ситуации предоставляется развитый инструментарий редактирования планов. Инструменты создания и редактирования планов миссий позволяют формировать и уточнять их с учетом специфики задач и условий их выполнения.

Такой подход позволяет структурировать и стандартизировать описание планов миссий в соответствии с общими принципами. Возможность создания универсального менеджера миссий на борту АПРК (без необходимости перепрограммирования для каждой новой миссии) обещает повысить эффективность планирования и выполнения миссий, снизить временные и ресурсные затраты.

Формирование типового плана миссии осуществляется экспертами предметной области в специализированной среде разработки миссий. На этом (стратегическом) уровне среда планирования будет включать и обеспечение полноты и корректности данных и параметров для требуемых в миссии команд, и контроль потенциальных результатов исполнения команд. На тактическом

уровне решаются подзадачи обхода препятствий, учета динамических изменений окружающей среды и др.

4. Архитектура комплексной системы планирования миссий с элементами искусственного интеллекта. Для описанного трехшагового планирования миссий с адаптивностью работы и автономностью подводного робототехнического комплекса предлагается интегрированное решение, объединяющее стратегическое, тактическое и исполнительное управление с использованием элементов искусственного интеллекта.

Для обеспечения отмеченного ряда этапов деятельности планирования миссии (таких как *формулировка абстрактной цели и разработка плана пошагового достижения цели* в условиях неопределенности, *конкретизация цели и реализация действий, направленных на ее достижение*) предлагается информационно-управляющая система, включающая рабочие места эксперта и инженера с интеллектуальной поддержкой, и программный супервизор с генератором групп конкретных команд (участков плана), имитирующий умные решения на основе способности интерпретировать декларативные знания (рисунок 1).



Рис. 1. Архитектура системы планирования миссий АРПК

Основой ИУС являются база знаний о возможностях и вариантах реагирования АПРК на разные ситуации при выполнении типовой задачи и программный менеджер миссий, который умеет читать текущую ситуацию и руководствоваться этой базой для выбора команд на исполнение и перевода их на требуемый исполнителю язык.

Набор правил является результатом передачи «стратегического» плана, адаптированного к текущей исходной ситуации, на тактический уровень, а менеджер миссий передает результат ее интерпретации на исполнительный уровень (рисунок 2).

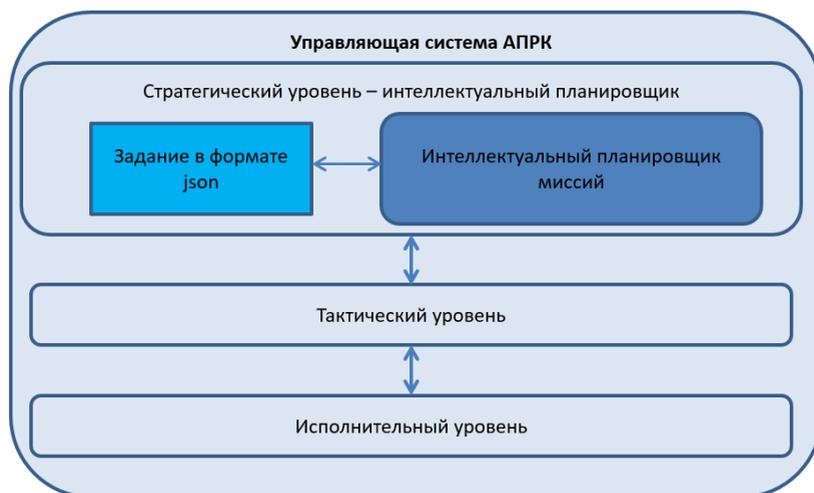


Рис. 2. Схема управляющей системы АПРК

Планы действий размещаются в трех информационных компонентах: в библиотеке миссий (где хранятся типовые планы), конкретный набор правил, и текущая плановая цепочка. Для взаимной преемственности (и повторной используемости) создана онтология предметной области – структура (язык) описания миссии (листинг 1) с соглашениями по ее применению.

Онтология определяет структуру записи знаний и другой информации (как семантический шаблон), правила их формирования знаний и интерпретации. Семантический шаблон – необходимый элемент декларативного представления данных и знаний. В основу декларативного представления положено двухуровневое представление информации, а для построения самой онтологии

используется язык описания метаинформации [28, 29]. Реализация данного решения выполнена на платформе IACPaaS (<https://iacpaas.dvo.ru>) [28].

```

План задания АПРК {СПИСОК}
Исходные данные задания {СПИСОК}
    параметр задания
    конфигурация оборудования
Подмиссия (Правило) {СПИСОК}
    пояснение (Строковое)
Условия {СПИСОК} ('сору')
    Сообщения о событиях*{СПИСОК}
        Сообщение о событии (Строковое)
        исключение(Строковое)
        нет сигналов(Строковое)
    Значения переменных и состояние процесса
        состояние процесса
    Требуемые вычисления {СПИСОК}
        вычислительная функция {СПИСОК}
            входной параметр
            ожидаемый результат
        код выполнения
    Присваивание значения{СПИСОК}
Блок с действиями{СПИСОК}
    Команда{СПИСОК} ('list')
        исполнитель(Строковое)
    входные параметры команды ('set')
    Результаты{СПИСОК}
        ожидаемый ответ
        возможное исключение
    повторение {СПИСОК}
        конечное множество для цикла
        Команда
    Ожидаемое изменение состояния процесса
    
```

Листинг 1. Модель онтологии описания и хранения миссии

Информационный компонент системы, содержащий знание о вариантах реагирования конкретного АПРК на разные ситуации при выполнении запланированной задачи, обеспечивает процесс принятия решений в реальном времени. Этот компонент создается в соответствии с онтологией. Семантические шаблоны записи типовых и конкретизированных планов миссий идентичны. Такая архитектура позволяет классифицировать соответствующий программный интерпретатор (менеджер миссий) как онтолого-ориентированный. Учитывая, что данный модуль осуществляет прием входных данных от

менеджера команд и генерирует упорядоченные командные последовательности для исполнительных устройств, то должен быть реализован для развертывания непосредственно на борту автономного комплекса.

Система планирования включает *среду разработки миссий, библиотеку миссий, среду описания задания, среду создания системных библиотек*. Ключевые компоненты взаимодействуют через четко определенные интерфейсы. Использование JSON в качестве формата передачи данных обеспечивает универсальность, читаемость и легкую интеграцию с различными подсистемами (рисунок 2).

Среда разработки миссий включает специализированный редактор описания планов, функционирующий на основе единой онтологии, что обеспечивает стандартизацию и совместимость создаваемых планов. Важной особенностью редактора является возможность абстрагирования от технических деталей, позволяющая экспертам сосредоточиться на высокоуровневом описании задач и их логической последовательности. Эта среда предоставляет экспертам предметной области интуитивно понятный инструментарий для формирования и редактирования планов миссий (рисунок 3). Созданные планы миссий сохраняются в *библиотеке миссий*, которая служит централизованным репозиторием для хранения и повторного использования ранее разработанных общих сценариев. Среда обеспечивает эффективный механизм поиска и выбора подходящих планов, а для адаптации выбранного под конкретные условия выполнения миссии имеется *среда описания задания*.

Среда создания системных библиотек поддерживает формирование набора вспомогательных информационных ресурсов:

- оборудование и характеристики АПРК, включая динамические и технические параметры,
- стандартизированные наборы команд и событий, согласованные с разработчиками программного обеспечения тактического и стратегического уровней,
- вычислительные операции и алгоритмы обработки данных, используемые в ходе выполнения миссий.

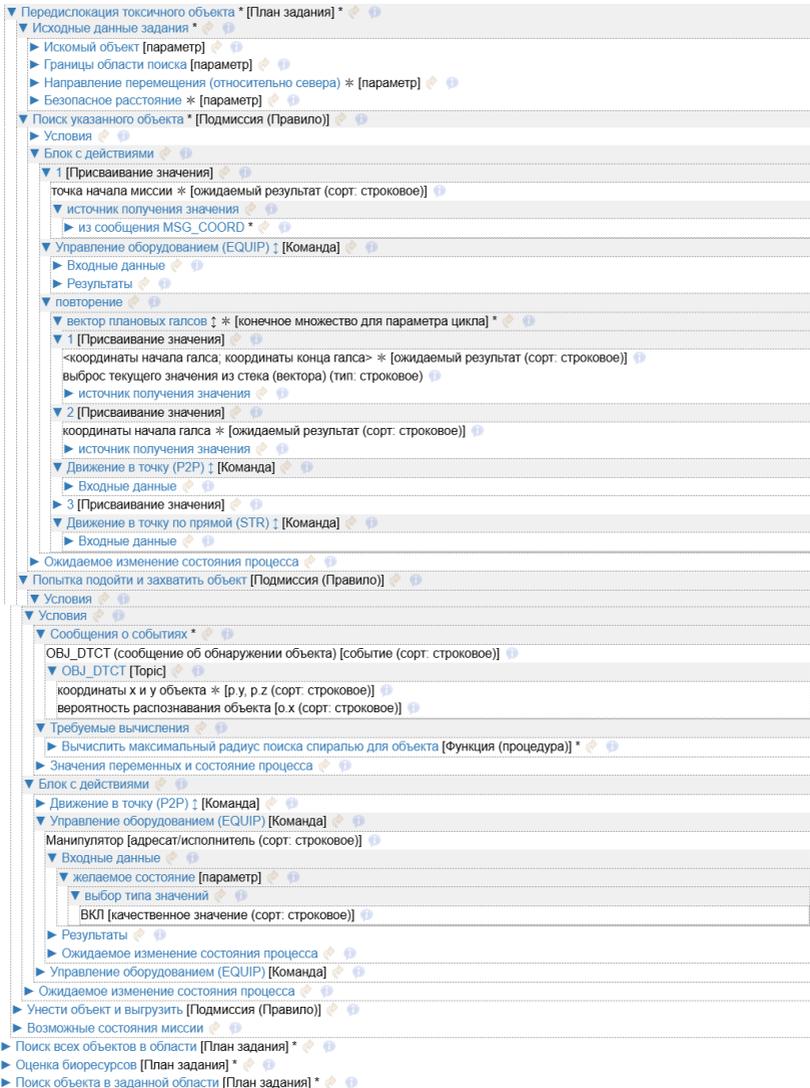


Рис. 3. Скриншот библиотеки описания типовых миссий на платформе IACPaaS

Среда описания задания предназначена для детализации параметров выполнения конкретного задания. В этой среде оператор задает:

- точные технические характеристики задействованных модулей АПРК (двигателей, систем технического зрения, манипуляторов и др.);
- географические координаты и параметры рабочей зоны;
- дополнительные условия выполнения миссии.

Результатом работы в этой среде является задание (экспортируемое в формат JSON), содержащее:

- выбранный план миссии из библиотеки,
- уточненные технические параметры АПРК,
- детальные характеристики рабочей среды.

Система планирования миссий использует облачную платформу IASaaS [29], которая обеспечивает возможность формирования знаний в структурированном и интерпретируемом виде и поддерживает коллективную разработку.

ИУС реализует *трехуровневую модель управления*, обеспечивающую гибкость и адаптивность выполнения миссий. На *стратегическом уровне* производится интеллектуальное планирование типовых миссий с контролем полноты и выполнимости; проводится адаптация глобальных задач к локальным условиям выполнения с анализом полученного задания и выполнимости при исходном состоянии ресурсов АПРК.

На *тактическом уровне* менеджер миссий анализирует полученное конкретное задание, выбирает плановые действия, применимые при текущем состоянии ресурсов АПРК и известных внешних условиях. Он оценивает достижимость подцелей, принимает решения о корректировке маршрута или миссии или о ее досрочном завершении при возникновении критических ситуаций, отвечает за координацию работы подсистем для выполнения текущих задач. Тем самым менеджер миссий связывает стратегический уровень с тактическим уровнем.

Исполнительный уровень, представленный менеджером команд, обеспечивает непосредственное выполнение сформированных команд (движение, манипуляции, сбор данных), мониторинг состояния систем АПРК, обратную связь с вышестоящими уровнями управления.

Онтологический подход важен для стандартизации форматов данных, возможности повторного использования планов миссий и их легкой адаптации к параметрам выполнения задач.

Предусмотренный механизм поиска и выбора планов в библиотеке типовых планов (которые затем адаптируются под конкретные условия выполнения миссии) значительно сокращает время подготовки новых заданий и повышает согласованность различных миссий.

5. Метод реализации среды планирования миссии и среды симуляции выполнения плана в условиях возникающих ситуаций. Менеджер миссий имеет модули для приема и обработки сообщений и для выполнения инструкций.

Модуль приема и обработки сообщений (рисунок 4):

- обеспечивает интеграцию с ROS (Robot Operating System),
- реализует механизмы подписки на топики и фильтрации сообщений,
- обеспечивает корректную интерпретацию поступающих данных в контексте выполняемой миссии.

Модуль выполнения инструкций:

- проводит проверку условий перехода между этапами миссии,
- выполняет необходимые вычисления для уточнения параметров выполнения,
- формирует команды для тактического уровня на основе текущего состояния системы,
- обеспечивает механизмы обратной связи и корректировки плана выполнения.

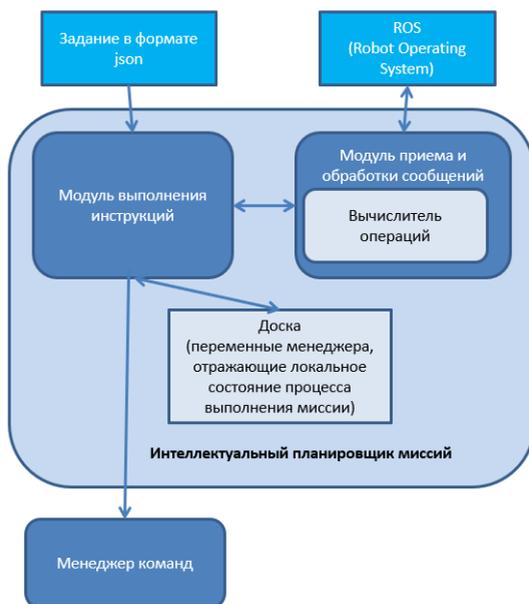


Рис. 4. Модель ИПМ на тактическом уровне

Пример работы Модуля приема и обработки сообщений в среде симуляции после получения конкретных значений s_0 : по выбранной начальной подмиссии вычисляется вектор координат-точек (с учетом ширины гидролокатора бокового обзора (и размера его перекрытия на встречных курсах) и выдается команда перехода в начальную точку. Симулируется обход галсами по заданным координатам. Проверяется, что общая длина галсов не больше максимальной дальности аппарата (рисунок 5). Приходит сообщение от гидролокатора бокового обзора об обнаружении объекта, его координатах и проценте достоверности. Проверяется, что процент достоверности больше заданного (80%), и запускается подмиссия, в которой при прибытии в точку обнаружения включается камера и запускается поиск по спирали. Приходит сообщение об обнаружении объекта камерой.

```

ub24-04@ub24-04-VMware-Virtual-Platform: ~/anpa_msg4$ ros2 run node_m PsSub
Миссия - Галс
Миссия - Идти в точку
Миссия - Подъем объекта
Вектор события - [['Галс', ['Начальная'], '', '']]
Вектор события - [['Идти в точку', ['Галс'], 'Pose', 'obj_dtct_gbo']]
Вектор события - [['Подъем объекта', ['Обход найденных точек'], 'Pose', 'obj_dtct_cam']]
===== Миссия Галс
вычислить fv_gals
Результат функции [[100.0, 112.0], [200.0, 112.0], [200.0, 136.0], [100.0, 136.0], [100.0, 160.0], [200.0, 160.0], [200.0, 184.0], [100.0, 184.0]]
вычислить Path_Lenght
Результат функции 2384.0
Условие Проверка ограничения на макс путь
2384.0 < 8222.0
Результат вычисления условия: True
Подписчик и Паблишер на Pose и Vector3 активированы
===== Init
> > > > > > Pose ( 100.0 112.0 10.0 1.3 1.1 0.0 1.0 )
> > > > > > Pose ( 1.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 7.0 )
> > > > > > Pose ( 200.0 112.0 10.0 1.3 1.1 0.0 1.0 )
> > > > > > Pose ( 200.0 136.0 10.0 1.3 1.1 0.0 1.0 )
> > > > > > Pose ( 100.0 136.0 10.0 1.3 1.1 0.0 1.0 )
> > > > > > Pose ( 100.0 160.0 10.0 1.3 1.1 0.0 1.0 )
> > > > > > Pose ( 200.0 160.0 10.0 1.3 1.1 0.0 1.0 )
> > > > > > Pose ( 200.0 184.0 10.0 1.3 1.1 0.0 1.0 )
> > > > > > Pose ( 100.0 184.0 10.0 1.3 1.1 0.0 1.0 )
< < < Pose ( 126.1665 125.645652 65.1354 91.0 22.2 31.1 1.0 ) Topik obj_dtct_gbo
Обрабатываем сообщение POSE
ИД объекта 1.0 Координаты 126.17 125.65 65.14 Вероятность 91.00 %
Нашли [[126.1665, 125.645652, 65.1354, 91.0]]
Запуск миссии Идти в точку
===== Миссия Идти в точку
Условие Порог процентов
81.0 > 80.0
Результат вычисления условия: True
> > > > > > Pose ( 126.1665 125.645652 9.99 1.3 1.1 0.0 1.0 )
> > > > > > Pose ( 2.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 7.0 )
> > > > > > Pose ( 2.88 8.22 65.1354 9.3 3.0 0.0 5.0 )
< < < Pose ( 126.5 125.2 65.14 91.0 22.2 31.1 1.0 ) Topik obj_dtct_cam
Обрабатываем сообщение POSE
ИД объекта 1.0 Координаты 126.50 125.20 65.14 Вероятность 91.00 %

```

Рис. 5. Фрагмент работы менеджера миссий

5. Заключение. В работе предложены метод, принципы создания и архитектура комплекса информационных и программных компонентов интеллектуального планировщика миссий автономных подводных робототехнических комплексов. Разработанный метод обеспечивает ряд ключевых преимуществ: достижение высокой степени стандартизации благодаря онтологическому подходу; повышение гибкости и адаптивности за счёт реализации трехуровневой системы управления; возможность полностью автономного функционирования в условиях динамически изменяющейся операционной обстановки; существенное сокращение временных затрат на подготовку новых миссий; широкую адаптируемость решения к конкретным требованиям различных типов миссий и классов АПРК.

Важнейшим элементом системы стала единая онтология планирования миссий, использующая семантические шаблоны стратегического уровня и составляющая основу специализированной среды разработки. Метод стандартизованного описания планов миссий в соответствии с данной онтологией гарантирует их совместимость, непротиворечивость и возможность многократного повторного использования в разнообразных операционных контекстах, что в совокупности способствует созданию качественно нового уровня автономности подводных робототехнических систем.

Литература

1. Aldhaferi S., Masi G.D., Pairet E., Ardón P. Underwater Robot Manipulation: Advances, Challenges and Prospective Ventures // Proceedings of the OCEANS 2022 – Chennai. 2022. pp. 1–7. DOI: 10.1109/OCEANSChennai45887.2022.9775489.
2. Sahoo A., Dwivedy S.K., Robi P.S. Advancements in the field of autonomous underwater vehicle // Ocean Engineering. 2019. vol. 181. pp. 145–160. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.011.
3. Antonelli G. Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003. 268 p.
4. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Тимошенко А.А. Особенности выполнения технологических операций с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов, оснащаемых многозвенными манипуляторами // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2024. № 3(235). С. 165–177.
5. Azar A.T., Koubaa A. Artificial Intelligence for Robotics and Autonomous Systems Applications. Springer Cham. 2023. 486 p.
6. Kirchner F., Straube S., Kühn D., Hoyer N. AI Technology for Underwater Robots. Springer Cham. 2020. 193 p.
7. Машошин А.И. Технологии искусственного интеллекта в задачах управления автономным необитаемым подводным аппаратом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23. № 11. С. 596–606.

8. Петров А.А. Активное формирование моделей проблемной среды оцувствленными роботами. М.: Институт проблем передачи информации РАН, 1997. 229 с.
9. Раговский А.П. Интеллектуальная динамическая система формирования заданий для автономных необитаемых подводных аппаратов // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2015. № 4. С. 100–108.
10. Blum A., Furst M. Fast planning through planning graph analysis // Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-95). Montreal, Canada. 1995. pp. 1636–1642.
11. Liu F., Xu W., Feng Z., Yu C., Liang X., Su Q., Gao J. Task Allocation and Path Planning Method for Unmanned Underwater Vehicles // Drones. 2025. vol. 9. no. 6. DOI: 10.3390/drones9060411.
12. Maier S., Kiam J., Schulte A. Adaptive Mission Planning: Evaluation of a Hybrid Cognitive Mixed-Initiative Planning Assistant in Manned-Unmanned Teaming Operations // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). 2024. pp. 3492–3499. DOI: 10.1109/SMC54092.2024.10831141.
13. Cunningham T., Spencer D. Automated Onboard Mission Planning for Robust and Flexible Rover Operations // Proceedings of the IEEE Aerospace Conference (AERO). 2022. pp. 1–19. DOI: 10.1109/AERO53065.2022.9843729.
14. Bian X., Chen T., Yan Z., Qin Z. Autonomous mission management and intelligent decision for AUV // Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2009. pp. 2101–2106. DOI: 10.1109/ICMA.2009.5246027.
15. Simetti E., Campos R., Vito D.D., Quintana J., Antonelli G., Garcia R., Turetta A. Sea Mining Exploration With an UVMS: Experimental Validation of the Control and Perception Framework // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2021. vol. 26. no. 3. pp. 1635–1645. DOI: 10.1109/TMECH.2020.3025973.
16. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве. Владивосток: Дальнаука, 2016. 400 с.
17. Chen L., Liu Y., Dong P., Liang J., Wang A. An Intelligent Navigation Control Approach for Autonomous Unmanned Vehicles via Deep Learning-Enhanced Visual SLAM Framework // IEEE Access. 2023. vol. 11. pp. 119067–119077. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3326754.
18. Lin J., Liang T., Ma G., Li B., Yu T. Research on SLAM Intelligent Robot Based on Visual Laser Fusion // Proceedings of the 8th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC). 2024. pp. 53–57. DOI: 10.1109/CRC60659.2023.10488663.
19. Борейко А.А., Инзарцев А.В., Машошин А.И., Павин А.М., Пашкевич И.В. Система управления АНПА большой автономности на базе мультиагентного подхода // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 2(28). С. 23–31.
20. Ferri G., Faggiani A., Celi F., Tesi A., Been R. Exploiting Behaviour Trees in Underwater Autonomous Robotic Networks // Proceedings of the OCEANS 2024 – Singapore. 2024. pp. 1–10. DOI: 10.1109/OCEANS51537.2024.10682233.
21. Han S., Zhao J., Li X., Yu J., Wang S., Liu Z. Online Path Planning for AUV in Dynamic Ocean Scenarios: A Lightweight Neural Dynamics Network Approach // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2024. vol. 9. no. 2. pp. 3782–3795. DOI: 10.1109/TIV.2024.3356529.
22. Chatterjee I., Zalte S. Machine Learning Applications: From Computer Vision to Robotics. Wiley-IEEE Press. 2023. 240 p.

23. Guo J., Li D., He B. Intelligent Collaborative Navigation and Control for AUV Tracking // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021. vol. 17. no. 3. pp. 1732–1741. DOI: 10.1109/TII.2020.2994586.
24. Liu X.-F., Fang Y., Zhan Z.-H., Jiang Y.-L., Zhang J. A Cooperative Evolutionary Computation Algorithm for Dynamic Multiobjective Multi-AUV Path Planning // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2024. vol. 20. no. 1. pp. 669–680. DOI: 10.1109/TII.2023.3268760.
25. Guo Y., Fang X., Dong Z., Mi H. Research on multi-sensor information fusion and intelligent optimization algorithm and related topics of mobile robots // EURASIP J. Adv. Signal Process. 2021. vol. 2021. DOI: 10.1186/s13634-021-00817-4.
26. Li X., Xu S. Multi-Sensor Complex Network Data Fusion Under the Condition of Uncertainty of Coupling Occurrence Probability // IEEE Sensors Journal. 2021. vol. 21. no. 22. pp. 24933–24940. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3061437.
27. Инзарцев А.В., Грибова В.В., Клещёв А.С. Интеллектуальная система для формирования адекватного поведения автономного подводного робота в аварийных ситуациях // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2(20). С. 4–11.
28. Gribova V., Moskalenko P., Timchenko V., Shalfeyeva E. Intelligent Services Development Technology Using the IACPaaS Cloud Platform // Communications in Computer and Information Science. 2022. vol. 1625. pp. 19–38. DOI: 10.1007/978-3-031-15882-7_2.
29. Gribova VV, Moskalenko PM, Timchenko VA, Shalfeyeva EA. The IACPaaS Platform for Developing Systems Based on Ontologies: A Decade of Use. Scientific and Technical Information Processing. 2023. vol. 50(5). pp. 406–413. DOI: 10.3103/S0147688223050064.

Грибова Валерия Викторовна — д-р техн. наук, член-корреспондент РАН, зам. директора по научной работе, ИАПУ ДВО РАН. Область научных интересов: семантическое моделирование, онтологический инжиниринг, технологии создания гибридных интеллектуальных систем. Число научных публикаций — 400. gribova@iacp.dvo.ru; улица Радио, 5, 690041, Владивосток, Россия; р.т.: +7(423)231-3999.

Шалфеева Елена Арефьевна — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория интеллектуальных систем имени А.С. Клещева, ИАПУ ДВО РАН. Область научных интересов: семантическое моделирование, объяснительный искусственный интеллект, онтологический инжиниринг, технология программирования, технология создания систем с декларативными базами знаний. Число научных публикаций — 120. shalf@dvo.ru; улица Радио, 5, 690041, Владивосток, Россия; р.т.: +7(423)231-0424.

Филаретов Владимир Федорович — заведующий лабораторией, лаборатория робототехнических систем, ИАПУ ДВО РАН. Область научных интересов: робототехника, мехатроника, управление сложными динамическими объектами, адаптивное управление. Число научных публикаций — 600. filaret@iacp.dvo.ru; улица Радио, 5, 690041, Владивосток, Россия; р.т.: +7(423)231-0439.

Зуев Александр Валерьевич — д-р техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, лаборатория робототехнических систем, ИАПУ ДВО РАН. Область научных интересов: робототехника, мехатроника, адаптивное управление, отказоустойчивое управление. Число научных публикаций — 200. zuev@iacp.dvo.ru; улица Радио, 5, 690041, Владивосток, Россия; р.т.: +7(423)231-0439.

Юхимец Дмитрий Александрович — д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория робототехнических систем, ИАПУ ДВО РАН. Область научных интересов: робототехника, групповое управление, робастное управление. Число научных публикаций — 55. undim@iacp.dvo.ru; улица Радио, 5, 690041, Владивосток, Россия; р.т.: +7(423)231-0439.

Поддержка исследований. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-41-00044 (<https://rscf.ru/project/25-41-00044>).

V. GRIBOVA, E. SHALFEEVA, V. FIALRETOV, A. ZUEV, D. YUKHIMETS
**THE METHOD OF INTELLIGENT MISSION PLANNING FOR
AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES**

Gribova V., Shalfeeva E., Fialretov V., Zuev A., Yukhimets D. The Method of Intelligent Mission Planning for Autonomous Underwater Vehicles.

Abstract. Creation of fully autonomous unmanned underwater vehicles and systems capable of performing various research and technological operations under uncertainty conditions is a pressing issue. The key problem is automatic mission correction in real time based on data from onboard systems. The aim of this work is to develop a method for intelligent mission planning at the strategic control level of autonomous underwater robotic systems, enabling automatic generation of adaptive plans and their transformation into tactical-level executable commands for operation in changing environmental conditions. In the article, the authors define the principles of developing an intelligent mission planner for autonomous underwater robotic systems (AURS) at the strategic level and a mission manager for managing the mission at the tactical level with the formation of specific tasks for performers. A formal model for planning missions through many linear sections with preconditions and postconditions has been developed. The key aspect of the proposed solution is the use of an ontological approach to standardize the description of missions and ensure their software interpretation. A specialized mission development environment has been created on the IACPaaS cloud platform, allowing experts to form and adapt mission plans without delving into technical details. The set of tools with a modular architecture has been developed, ensuring scalability and adaptation of the solution for various classes of submarines and types of missions. The results of testing have shown that the proposed solution allows for the formation of flexible plans that take into account the diversity of situations and automatically select command sequences depending on the incoming data. The results obtained open up new possibilities for creating fully autonomous underwater systems capable of performing complex research and technological operations without constant operator control. Further research is aimed at improving the mission manager algorithms, as well as integrating the planner with other onboard support components.

Keywords: autonomous underwater vehicle, robotic complex, intelligent planning, mission, uncertainty.

References

1. Aldhaheri S., Masi G.D., Pairet E., Ardón P. Underwater Robot Manipulation: Advances, Challenges and Prospective Ventures. Proceedings of the OCEANS 2022 – Chennai. 2022. pp. 1–7. DOI: 10.1109/OCEANSChennai45887.2022.9775489.
2. Sahoo A., Dwivedy S.K., Robi P.S. Advancements in the field of autonomous underwater vehicle. Ocean Engineering. 2019. vol. 181. pp. 145–160. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.011.
3. Antonelli G. Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003. 268 p.
4. Filaretov V.F., Zuev A.V., Timoshenko A.A. [Features of performing technological operations using autonomous uninhabited underwater vehicles equipped with multi-link manipulators]. Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk – Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2024. no. 3(235). pp. 165–177. (In Russ.).

5. Azar A.T., Koubaa A. Artificial Intelligence for Robotics and Autonomous Systems Applications. Springer Cham. 2023. 486 p.
6. Kirchner F., Straube S., Kühn D., Hoyer N. AI Technology for Underwater Robots. Springer Cham. 2020. 193 p.
7. Mashoshin A.I. [Artificial intelligence technologies in the control tasks of an autonomous uninhabited underwater vehicle]. Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie –Mechatronics, automation, control. 2022. vol. 23. no. 11. pp. 596–606.
8. Petrov A.A. Aktivnoe formirovanie modelei problemnoi sredy ochuvstvlennymi robotami [Active formation of problem environment models by sensitive robots]. Moscow: Institute of Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences, 1997. 229 p. (In Russ.).
9. Ragsvskii A.P. [An intelligent dynamic task generation system for autonomous uninhabited underwater vehicles]. Problemy razvitiia korabelnogo voozuzheniia i sudovogo radioelektronnogo oborudovaniia – Problems of development of ship armament and ship radio-electronic equipment. 2015. no. 4. pp. 100–108. (In Russ.).
10. Blum A., Furst M. Fast planning through planning graph analysis. Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-95). Montreal, Canada. 1995. pp. 1636–1642.
11. Liu F., Xu W., Feng Z., Yu C., Liang X., Su Q., Gao J. Task Allocation and Path Planning Method for Unmanned Underwater Vehicles. Drones. 2025. vol. 9. no. 6. DOI: 10.3390/drones9060411.
12. Maier S., Kiam J., Schulte A. Adaptive Mission Planning: Evaluation of a Hybrid Cognitive Mixed-Initiative Planning Assistant in Manned-Unmanned Teaming Operations. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). 2024. pp. 3492–3499. DOI: 10.1109/SMC54092.2024.10831141.
13. Cunningham T., Spencer D. Automated Onboard Mission Planning for Robust and Flexible Rover Operations. Proceedings of the IEEE Aerospace Conference (AERO). 2022. pp. 1–19. DOI: 10.1109/AERO53065.2022.9843729.
14. Bian X., Chen T., Yan Z., Qin Z. Autonomous mission management and intelligent decision for AUV. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2009. pp. 2101–2106. DOI: 10.1109/ICMA.2009.5246027.
15. Simetti E., Campos R., Vito D.D., Quintana J., Antonelli G., Garcia R., Turetta A. Sea Mining Exploration With an UVMS: Experimental Validation of the Control and Perception Framework. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2021. vol. 26. no. 3. pp. 1635–1645. DOI: 10.1109/TMECH.2020.3025973.
16. Filaretov V.F., Iukhimets D.A. Osobennosti sinteza vysokotochnykh sistem upravleniia skorostnym dvizheniem i stabilizatsiei podvodnykh apparatov v prostranstve [Features of synthesis of high-precision control systems for high-speed movement and stabilization of underwater vehicles in space]. Vladivostok: DalnaukaPubl., 2016. 400 p. (In Russ.).
17. Chen L., Liu Y., Dong P., Liang J., Wang A. An Intelligent Navigation Control Approach for Autonomous Unmanned Vehicles via Deep Learning-Enhanced Visual SLAM Framework. IEEE Access. 2023. vol. 11. pp. 119067–119077. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3326754.
18. Lin J., Liang T., Ma G., Li B., Yu T. Research on SLAM Intelligent Robot Based on Visual Laser Fusion. Proceedings of the 8th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC). 2024. pp. 53–57. DOI: 10.1109/CRC60659.2023.10488663.
19. Boreiko A.A., Inzartsev A.V., Mashoshin A.I., Pavin A.M., Pashkevich I.V. [AUV control system with high autonomy based on a multi-agent approach]. Podvodnye issledovaniia i robototekhnika – Underwater research and robotics. 2019. no. 2(28). pp. 23–31.

20. Ferri G., Faggiani A., Celi F., Tesei A., Been R. Exploiting Behaviour Trees in Underwater Autonomous Robotic Networks. *Proceedings of the OCEANS 2024 – Singapore*. 2024. pp. 1–10. DOI: 10.1109/OCEANS51537.2024.10682233.
21. Han S., Zhao J., Li X., Yu J., Wang S., Liu Z. Online Path Planning for AUV in Dynamic Ocean Scenarios: A Lightweight Neural Dynamics Network Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2024. vol. 9. no. 2. pp. 3782–3795. DOI: 10.1109/TIV.2024.3356529.
22. Chatterjee I., Zalte S. *Machine Learning Applications: From Computer Vision to Robotics*. Wiley-IEEE Press. 2023. 240 p.
23. Guo J., Li D., He B. Intelligent Collaborative Navigation and Control for AUV Tracking. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. vol. 17. no. 3. pp. 1732–1741. DOI: 10.1109/TII.2020.2994586.
24. Liu X.-F., Fang Y., Zhan Z.-H., Jiang Y.-L., Zhang J. A Cooperative Evolutionary Computation Algorithm for Dynamic Multiobjective Multi-AUV Path Planning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024. vol. 20. no. 1. pp. 669–680. DOI: 10.1109/TII.2023.3268760.
25. Guo Y., Fang X., Dong Z., Mi H. Research on multi-sensor information fusion and intelligent optimization algorithm and related topics of mobile robots. *EURASIP J. Adv. Signal Process*. 2021. vol. 2021. DOI: 10.1186/s13634-021-00817-4.
26. Li X., Xu S. Multi-Sensor Complex Network Data Fusion Under the Condition of Uncertainty of Coupling Occurrence Probability. *IEEE Sensors Journal*. 2021. vol. 21. no. 22. pp. 24933–24940. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3061437.
27. Inzartcev A.V., Gribova V.V., Kleshchev A.S. [An intelligent system for the formation of adequate behavior of an autonomous underwater robot in emergency situations]. *Podvodnye issledovaniia i robototekhnika – Underwater research and robotics*. 2015. no. 2(20). pp. 4–11. (In Russ.).
28. Gribova V., Moskalenko P., Timchenko V., Shalfeyeva E. Intelligent Services Development Technology Using the IACPaaS Cloud Platform. *Communications in Computer and Information Science*. 2022. vol. 1625. pp. 19–38. DOI: 10.1007/978-3-031-15882-7_2.
29. Gribova VV, Moskalenko PM, Timchenko VA, Shalfeyeva EA. The IACPaaS Platform for Developing Systems Based on Ontologies: A Decade of Use. *Scientific and Technical Information Processing*. 2023. vol. 50(5). pp. 406–413. DOI: 10.3103/S0147688223050064.

Gribova Valerya — Ph.D., Dr.Sci., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Deputy director for research, IACP FEB RAS. Research interests: semantic modeling, ontological engineering, technologies for creating hybrid intelligent systems. The number of publications — 400. gribova@iacp.dvo.ru; 5, Radio St., 690041, Vladivostok, Russia; office phone: +7(423)231-3999.

Shalfeyeva Elena — Ph.D., Dr.Sci., Leading researcher, A.S. Kleshchev laboratory of intelligent systems, IACP FEB RAS. Research interests: semantic modeling, explanatory artificial intelligence, ontological engineering, programming technology, technology for creating systems with declarative knowledge bases. The number of publications — 120. shalf@dvo.ru; 5, Radio St., 690041, Vladivostok, Russia; office phone: +7(423)231-0424.

Fialretov Vladimir — Head of the laboratory, Laboratory of robotic systems, IACP FEB RAS. Research interests: robotics, mechatronics, control of complex dynamic objects, adaptive control. The number of publications — 600. filaret@iacp.dvo.ru; 5, Radio St., 690041, Vladivostok, Russia; office phone: +7(423)231-0439.

Zuev Aleksandr — Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Senior researcher, Laboratory of robotic systems, IACP FEB RAS. Research interests: robotics, mechatronics, adaptive control, fault-tolerant control. The number of publications — 200. zuev@iacp.dvo.ru; 5, Radio St., 690041, Vladivostok, Russia; office phone: +7(423)231-0439.

Yukhimets Dmitry — Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Leading researcher, Laboratory of robotic systems, IACP FEB RAS. Research interests: robotics, group control, robust control. The number of publications — 55. undim@iacp.dvo.ru; 5, Radio St., 690041, Vladivostok, Russia; office phone: +7(423)231-0439.

Acknowledgements. The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 25-41-00044 (<https://rscf.ru/project/25-41-00044>).