

УПРАВЛЯЮЩИЕ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.053

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ МИССИЙ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ С МНОГОЗВЕННЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ

© В. В. Грибова, Е. А. Шалфеева, В. Ф. Филаретов, А. В. Зуев,
Д. А. Юхимец

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5
E-mail: gribova@iacp.dvo.ru*

Современные тенденции в развитии подводной робототехники ориентированы на создание полностью автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащённых многозвенными манипуляторами (ММ) и способных выполнять комплекс исследовательских, манипуляционных и технологических операций в условиях динамической и неопределённой подводной среды без непосредственного участия оператора. Ключевой проблемой при реализации автономности обитаемых аппаратов является генерация и адаптивное корректирование управляющих программ в реальном времени на основе данных о текущем состоянии окружающей среды, получаемых от бортовых сенсоров АНПА и датчиков ММ. Предложен комплекс инструментальных средств интеллектуального планировщика миссий АНПА, включающий его информационные и программные компоненты, а также методологию разработки. Представленный планировщик обеспечивает декомпозицию стратегических задач на элементарные операции с динамическим выбором их последовательности и параметров исполнения в зависимости от актуальных данных и внешних условий. Архитектура разработанного инструментального комплекса базируется на принципах модульности и масштабируемости, что позволяет адаптировать систему планирования для различных классов АНПА и типов миссий. Представленное решение способствует развитию методов автономного управления АНПА и может быть использовано при проектировании перспективных робототехнических систем для морских исследований, мониторинга и подводных технологических операций.

Ключевые слова: автономные подводные аппараты, интеллектуальное планирование миссий, адаптивное управление, подводная робототехника.

DOI: 10.15372/AUT20260106

EDN: FVXZLM

Введение. Оценка современного состояния и тенденций развития подводной робототехники показывает существенное расширение областей применения автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА), а также значительное усложнение выполняемых ими задач [1, 2]. При этом в последние годы важнейшим направлением развития в этой области является оснащение АНПА многозвенными манипуляторами (ММ) для выполнения различных (даже сложных силовых) операций в полностью автономном режиме его зависания в водной среде вблизи объектов работ [3, 4].

Как показали многочисленные исследования [3, 5–7], одной из ключевых проблем, препятствующих реальному созданию указанных полностью автономных подводных аппаратов, является необходимость автоматизации формирования и коррекции программ этих роботов в реальном масштабе времени (РМВ). Будучи сформирована для поставленной общей цели (например, найти и поднять объект на дне, сделать съёмку морского дна,

выполнить очистку поверхности подводного объекта и т. д.), управляющая программа требует коррекции действий в РМВ в зависимости от информации о текущих условиях окружающей среды, поступающей от бортовых систем АНПА. Для решения этой проблемы при работе в сложных и неопределённых условиях рабочей среды необходима разработка информационно-управляющих систем (ИУС) нового поколения.

Современные системы управления робототехнических комплексов характеризуются многоуровневой иерархической архитектурой и элементами искусственного интеллекта [8], где сенсорные данные, команды оператора и информация от других систем распределяются по различным уровням обработки. Верхний стратегический уровень формирует концептуальную модель рабочей среды и определяет общий план выполнения миссий на основе априорных знаний, текущего состояния системы и характеристик оборудования, осуществляя декомпозицию задач на элементарные операции посредством интеллектуального планировщика миссий (ИПМ). Tактический уровень трансформирует эти операции в конкретные траектории движения АНПА и манипулятора, задавая параметры скорости и усилий, что позволяет реализовать требуемые законы управления. Исполнительный уровень непосредственно генерирует управляющие воздействия на движители и приводы с учётом обратных связей от датчиков состояния системы. Следует отметить, что многие проблемы реализации тактического и исполнительного уровней ИУС АНПА успешно решены [3, 4, 9, 10], созданы и продолжают развиваться интеллектуальные алгоритмы для автономной навигации, SLAM-систем [11–13], классификации объектов и оптимизации маршрутов [14–16], координации групп роботов [17, 18], обработки сенсорных данных в реальном времени [19, 20] и диагностики оборудования [21].

Созданные решения уже позволяют выполнять довольно сложные задачи в подводной среде, однако полная автономность и интеллектуальность АНПА остаётся ещё недостигнутой из-за большой сложности и неопределённости подводной среды, меняющихся условий функционирования данных АНПА, 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 ИУС АНПА на стратегическом уровне.

Целью данной работы является описание комплекса инструментальных средств и принципов создания ИПМ АНПА, реализуемого на стратегическом уровне ИУС, его информационных и программных компонентов.

Общий подход к разработке интеллектуальной системы планирования миссий для автономных необитаемых подводных аппаратов. Решение сложных интеллектуальных задач в контексте автономных подводных аппаратов требует системного подхода, включающего чёткую формулировку целей, разработку стратегии их достижения и реализацию соответствующих действий. Цели миссий определяются областью применения АНПА, включая научные исследования, военные операции, поисково-спасательные работы, экологический мониторинг или технологические задачи. Выделим концептуальные положения предлагаемого подхода.

Формирование планов миссий. Предлагаемый подход основывается на концепции многоуровневого использования типовых планов миссий, которые служат шаблонами для конкретных задач. В отличие от традиционного подхода, требующего разработки уникального алгоритма для каждой миссии (что принципиально невозможно из-за непредсказуемости подводной среды), реализована парадигма адаптивного планирования с применением специализированного декларативного предметно-ориентированного языка, т. е. ключевым аспектом является возможность повторного использования планов миссий, что позволяет

адаптировать типовые планы под различные задачи. Каждая конкретная миссия уточняет общий план через спецификацию характеристик АНПА и особенностей рабочей зоны.

Онтологический подход к стандартизации описания миссий. Для обеспечения унификации и совместимости планов миссий предлагается использовать онтологический подход. Единая онтология позволяет: структурировать и стандартизировать описание миссий; обеспечивать совместимость между различными планами; упрощать интеграцию новых миссий, что принципиально важно, без необходимости перепрограммирования бортовых систем. Этот подход способствует созданию универсального обработчика миссий на борту АНПА для повышения эффективности планирования и снижения временных и ресурсных затрат.

Архитектура системы планирования миссий. Предлагаемый подход подразумевает наличие следующих подсистем (компонентов).

Среда разработки планов миссий представляет собой специализированный программный комплекс для формализации и редактирования сценариев выполнения миссий (планов миссий), предоставляющий экспертам инструментарий проектирования, с помощью которого возможно осуществить декомпозицию задач на высоком уровне абстракции, формализовать логику выполнения операций и редактировать параметры миссии без погружения в технические детали реализации. Ключевым компонентом среды является онтологически-ориентированный редактор планов миссий, функционирующий на основе единой концептуальной модели (онтологии), что обеспечивает стандартизацию описания задач, семантическую согласованность элементов миссии и возможность повторного использования компонентов. В состав среды также входит подсистема формирования системных библиотек. Она необходима для описания возможных тактико-технических характеристик различных АНПА и бортовых систем, формализованного набора команд и событий, согласованного с разработчиками программного обеспечения тактического и исполнительного уровней АНПА и интегрированного с программными интерфейсами этих уровней управления, а также библиотеки вычислительных операций для обработки данных в реальном времени. Данная архитектура реализует сквозную формализацию процесса планирования миссий от концептуального уровня до исполняемых спецификаций, обеспечивая целостность и непротиворечивость разрабатываемых планов операций.

Библиотека планов миссий и системных библиотек служит репозиторием для хранения и повторного применения ранее разработанных планов миссий, системных библиотек (команд, событий, вычислительных операций, характеристик АНПА).

Среда описания заданий представляет собой специализированный модуль для конфигурации конкретных миссий, где оператор выбирает стандартизированный план миссии из библиотеки и детализирует технические параметры выполнения, включая конфигурацию АНПА и управляющих модулей, параметры систем технического зрения и навигационного оборудования, а также географические координаты и специфические характеристики рабочей зоны. Результатом работы среды является задание в формате JSON. Сформированный JSON-файл предназначен для загрузки в бортовую систему управления АНПА и содержит всю необходимую информацию для выполнения миссии с учётом текущих технических возможностей аппарата и условий окружающей среды.

Интеллектуальный планировщик миссий. Сгенерированное JSON-задание загружается в бортовую систему управления АНПА. Использование JSON-формата обеспечивает универсальность и читаемость структуры данных; лёгкость интеграции с различными программными компонентами. После загрузки интеллектуальная система управления АНПА интерпретирует задание и выполняет миссию в соответствии с заданным сценарием. На рис. 1 представлены связи подсистем планирования миссий.

Как уже отмечалось выше, на стратегическом уровне ИУС осуществляется общее планирование миссии в соответствии с описанием задания с учётом ресурсов АНПА, ра-

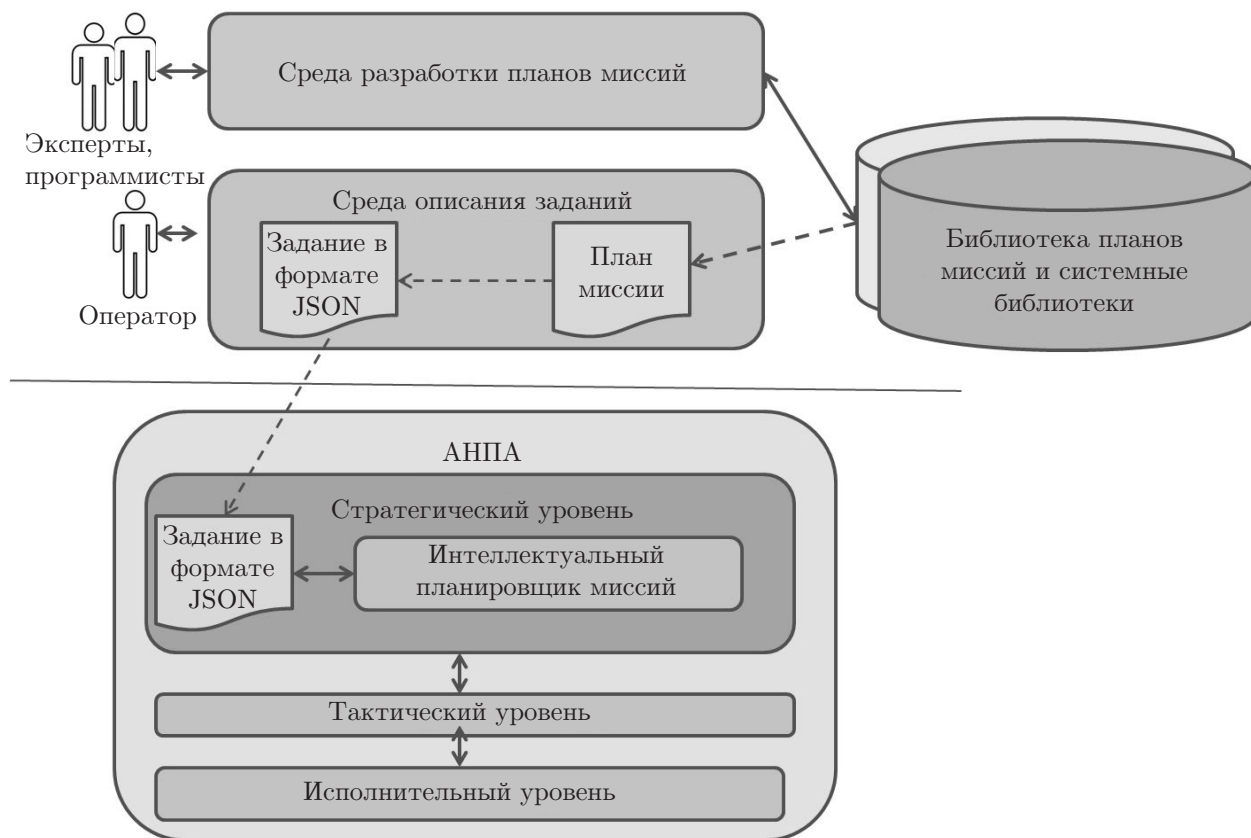


Рис. 1. Архитектурная схема системы планирования миссий АНПА

ботоспособности её компонентов и известных внешних условий. На данном уровне определяются варианты исполнения миссии в РМВ, изменения текущего маршрута и выполняемых задач. Это управление осуществляет ИПМ, который анализирует поступающие данные, оценивает текущую ситуацию и вносит необходимые изменения в планы работы миссий для достижения оптимальных результатов. Основные задачи интеллектуального планировщика включают:

- обеспечение полноты и корректности данных и параметров для требуемых в миссии команд;
- контроль результатов (пошагового) исполнения команд;
- выбор данных из альтернативных подцелей;
- при необходимости замену подцелей (и связанных с ними команд);
- назначение и добавление последовательностей выполнения команд;
- принятие решения о досрочном завершении миссий в экстренных ситуациях.

На тактическом уровне ИУС реализуется локальное планирование, которое адаптирует глобальные задачи к конкретным условиям работы отдельного устройства. На этом уровне решаются задачи, включающие обход препятствий, оптимизацию маршрута, анализ динамических изменений окружающей среды, распределение подзадач между подсистемами устройства и др. Используемое локальное планирование обеспечивает гибкость и автономность устройства в рамках заданных стратегических целей.

На исполнительном уровне ИУС осуществляется непосредственное выполнение команд, сформированных на тактическом уровне. Этот уровень включает управление всеми

исполнительными механизмами, сбор данных от датчиков, обработку сигналов и выполнение конкретных операций, обеспечивающих движение, манипуляции с объектами или передачу информации. Исполнительный уровень реализует точное и своевременное выполнение задач в соответствии с текущим планом миссии.

Таким образом, структура управления миссией включает три уровня: стратегический (планирование и корректировка), тактический (локальная адаптация) и исполнимый (реализация команд), что обеспечивает эффективное выполнение задач в условиях неизвестной и непрерывно изменяющейся окружающей среды.

Описание ИПМ. Интеллектуальный планировщик миссий, контролируя параметры, указанные в задании, и анализируя условия работы АНПА, осуществляет интерпретацию конкретного задания, выбирая очередной фрагмент плана миссии. При выполнении заданных условий ИПМ инициирует передачу выбранных групп команд (блоков) менеджеру команд на тактический уровень ИУС. В свою очередь, менеджер команд последовательно передаёт эти команды на исполнительный уровень, где осуществляется их выполнение. После выполнения каждой команды исполнительная система формирует обратную связь, предоставляя данные о результатах выполнения команд. Эта информация становится доступной ИПМ, что позволяет корректировать процесс, осуществляя мониторинг и выполнение всего задания в РМВ. Интеллектуальный планировщик миссий содержит два функциональных модуля:

1. Модуль приёма и обработки сообщений, обеспечивающий подписку на соответствующие топики в рамках архитектуры Robot Operating System (ROS) и осуществляющий приём входящих сообщений. Этот модуль реализует механизмы обработки и фильтрации сообщений, обеспечивая их корректную интерпретацию в выполняемой миссии.

2. Модуль выполнения инструкций, отвечающий за интерпретацию и выполнение инструкций, содержащихся в блоке задания, который ассоциирован с поступившим сообщением. В задачи этого модуля входит:

- 1) проверка условий для уточнения очередного этапа выполнения миссии;
- 2) проведение необходимых вычислений, заданных в соответствующем блоке задания, для уточнения деталей выполнения миссий (например, координат очередного галса, времени и возможности его выполнения в зависимости от заряда батареи и др.).

Интеллектуальный планировщик миссий осуществляет интерпретацию конкретного задания на основе контроля параметров, указанных в этом задании, и анализ условий работы АНПА, выбирая очередной фрагмент плана миссии. При выполнении заданных условий ИПМ инициирует передачу выбранных групп команд (блоков) менеджеру команд на тактический уровень интегрированной управляющей системы. Менеджер команд последовательно передаёт эти команды на исполнительный уровень, где осуществляется их выполнение. После выполнения каждой команды исполнительная система формирует обратную связь, предоставляя данные о результатах выполнения, которые становятся доступными ИПМ для корректировки процесса, что позволяет осуществлять мониторинг и выполнение всего задания в реальном масштабе времени.

Модуль выполнения инструкций представляет собой ключевой компонент системы управления АНПА, осуществляющий интерпретацию и исполнение командных последовательностей, ассоциированных с поступающими заданиями. Функциональный спектр модуля включает: 1) верификацию условий выполнения для детерминации текущего этапа миссии с последующей корректировкой операционного плана; 2) выполнение расчётных процедур, включающих определение пространственно-временных параметров (координаты галсов, временные интервалы) и оценку выполнимости операций с учётом энергетического баланса системы и других эксплуатационных ограничений.

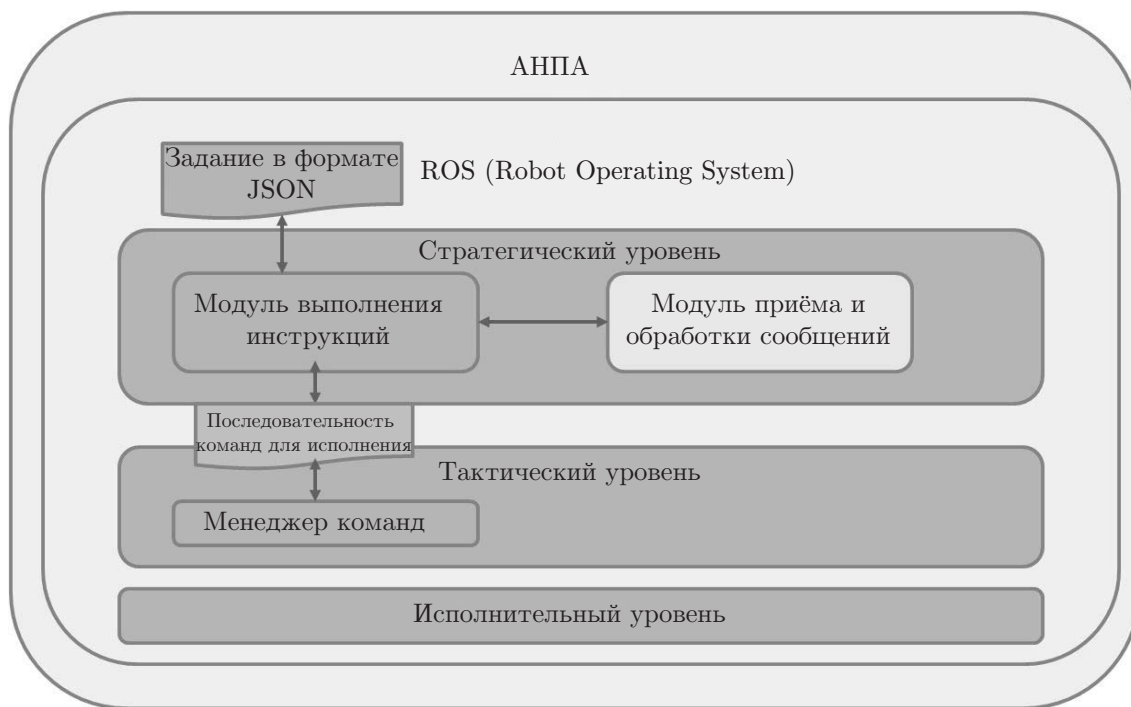


Рис. 2. Концептуальная архитектура ИПМ

Важным аспектом функционирования модуля является реализация механизма управления состоянием выполнения через систему переменных. Данный механизм включает три последовательных процесса: инициализацию переменных состояния (определение и конфигурация параметров для мониторинга критически важных показателей), динамическое обновление значений на основе поступающей телеметрии (обеспечивающее актуальное представление о состоянии системы в реальном времени) и адаптацию логики выполнения на основе актуализированных данных (включая принятие решений о дальнейших действиях и организацию обратной связи с вышестоящими системами управления). Завершающей функциональной составляющей модуля является генерация и трансляция командных пакетов для АНПА менеджеру команд. Архитектурно модуль интегрирован в единую систему управления, где взаимодействие с внешней средой обеспечивается подсистемой обработки сообщений через ROS-топики, а внутренняя логика выполнения реализует как детерминированные, так и адаптивные сценарии операций. Такая организация позволяет осуществлять эффективное управление миссиями в условиях операционной неопределённости, обеспечивая: 1) согласованную работу распределённых компонентов системы; 2) оперативную корректировку планов выполнения на основе актуальных данных; 3) поддержку единой программно-аппаратной платформы управления. Визуализация взаимосвязей уровней ИПМ представлена на рис. 2.

Представленная архитектура демонстрирует следующие преимущества: 1) обеспечение адаптивного управления в реальном времени; 2) поддержку принятия решений в условиях изменяющейся операционной обстановки; 3) интеграцию с ROS-экосистемой для распределённого управления; 4) реализацию замкнутого цикла контроля через механизм обратной связи. Это позволяет повысить эффективность выполнения сложных миссий в динамичной подводной среде.

Информационные ресурсы ИПМ. Информационными ресурсами ИПМ являются онтологии и сформированные по ним библиотеки планов миссий, дополнительные библиотеки, в терминах которых описываются планы миссий (команды, вычислительные опе-

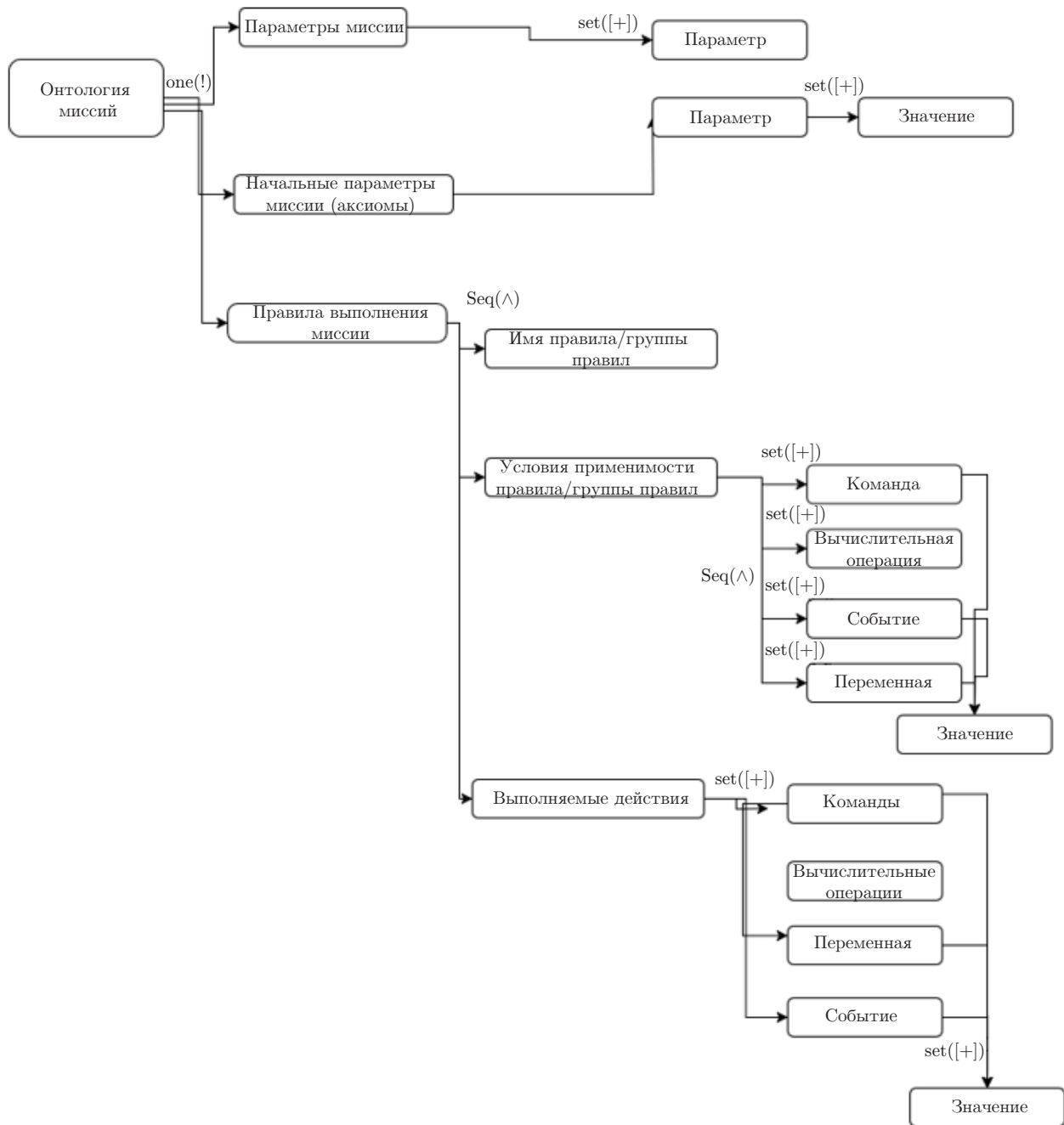


Рис. 3. Структурная схема онтологии планов миссий. Обозначения: one(!) — «в точности один», seq(Λ) — «непустая последовательность», set([+]) — «возможно пустое множество»

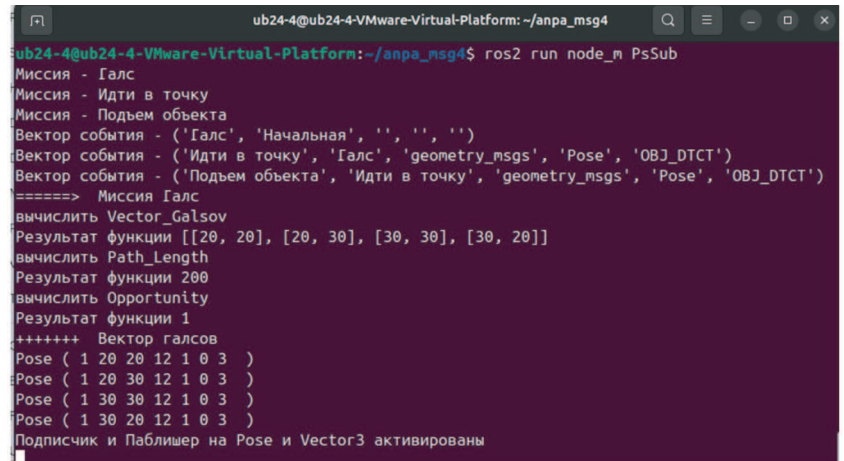
рации и события), а также библиотеки описания характеристик АНПА и многозвенных манипуляторов (ММ). Онтологии определяют структуры, задающие формат, правила и ограничения формирования соответствующих ресурсов.

Основным информационным компонентом, или ядром информационных ресурсов, является онтология планов миссий. Её укрупнённое схематическое представление в графическом виде представлено на рис. 3. Узлы графа содержат понятия, существенные для определения правил выполнения миссий и чередования её отдельных этапов.

Онтология планов миссий включает в себя три основных блока: описания параметров миссий, их аксиом и набора групп правил. Параметры миссий описывают необходимые значения конфигураций (моделей) их компонентов, которые требуется учитывать при формировании миссий, например модели гидролокатора бокового обзора, видеокамер, ММ и др.

Начальные параметры миссий (аксиом) задают начальные значения событий, с учётом которых начинается любая миссия. Основным элементом онтологии является блок описания правил выполнения миссий. Этот блок имеет модульное описание. Деление правил на модули в нём обусловлено двумя факторами: 1) возможным повторным использованием данного модуля в различных описаниях миссий (в частности, блок действий может быть повторно использован во всех описаниях миссий); 2) оптимизацией выбора одного из множества правил по ключевому событию/команде.

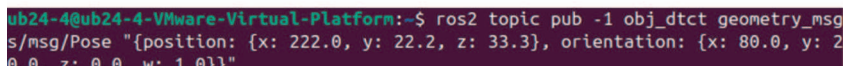
a



```

ub24-4@ub24-4-VMware-Virtual-Platform: ~/anpa_msg4
ub24-4@ub24-4-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', 'geometry_msgs', 'Pose', 'OBJ_DTCT')
Вектор события - ('Подъем объекта', 'Идти в точку', 'geometry_msgs', 'Pose', 'OBJ_DTCT')
=====> Миссия Галс
вычислить Vector_Galsov
Результат функции [[20, 20], [20, 30], [30, 30], [30, 20]]
вычислить Path_Length
Результат функции 200
вычислить Opportunity
Результат функции 1
++++++ Вектор галсов
Pose ( 1 20 20 12 1 0 3 )
Pose ( 1 20 30 12 1 0 3 )
Pose ( 1 30 30 12 1 0 3 )
Pose ( 1 30 20 12 1 0 3 )
Подписчик и Паблишер на Pose и Vector3 активированы
  
```

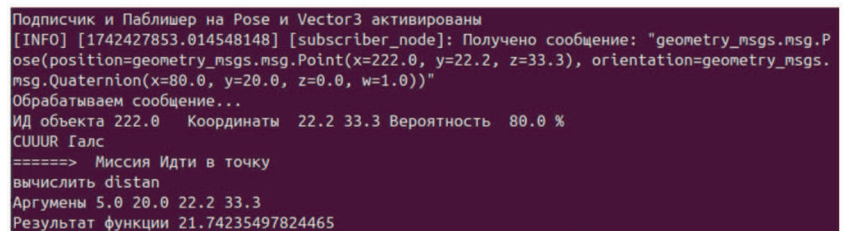
b



```

ub24-4@ub24-4-VMware-Virtual-Platform:~$ ros2 topic pub -1 obj_dtct geometry_msgs/msg/Pose "{position: {x: 222.0, y: 22.2, z: 33.3}, orientation: {x: 80.0, y: 20.0, z: 0.0, w: 1.0}}"
  
```

c



```

Подписчик и Паблишер на Pose и Vector3 активированы
[INFO] [1742427853.014548148] [subscriber_node]: Получено сообщение: "geometry_msgs.msg.Pose(position=geometry_msgs.msg.Point(x=222.0, y=22.2, z=33.3), orientation=geometry_msgs.msg.Quaternion(x=80.0, y=20.0, z=0.0, w=1.0))"
Обрабатываем сообщение...
ИД объекта 222.0 Координаты 22.2 33.3 Вероятность 80.0 %
CUUUR Галс
=====> Миссия Идти в точку
вычислить distan
Аргументы 5.0 20.0 22.2 33.3
Результат функции 21.74235497824465
  
```

Рис. 4. Фрагмент работы менеджера миссий: запуск начальной миссии (а), посылка сообщения (b), обработка сообщения и запуск следующей миссии (с)

Каждый блок включает условие применимости конкретного правила (с учётом множества значений событий) и множество пар: условия выполнения правила и действия, которые выполняются в случае, если все условия выполнены. Каждое условие применимости содержит группу условий, элементами которой могут быть значения переменных, событий или команд; действия состоят из множества команд, которые передаются менеджеру АНПА, содержащих вычислительные операции или события, значения которых будут использоваться при выборе очередного правила.

Реализация среды ИПМ. Реализация среды ИПМ включает два основных компонента: систему планирования миссии и непосредственно ИПМ, который размещается на АНПА. Система планирования миссий использует облачную платформу IACPaaS, построенную на основе онтологических баз знаний [21, 22]. Она обеспечивает возможность формирования знаний в структурированном и интерпретируемом виде и реализуется на отечественном программном обеспечении. Платформа IACPaaS поддерживает коллективную разработку, что позволяет отдельно и эффективно формировать сложные планы миссий. Свойство интегрируемости платформы с другими платформами и средами разработки обеспечено через программного агента обмена информацией, благодаря чему создаваемые на платформе ресурсы с информацией, описывающей миссии для АНПА, могут передаваться непосредственно на АНПА в формате JSON для последующей обработки.

Реализация ИПМ выполнена на языке Python. На рис. 4 продемонстрирован фрагмент запуска начальной миссии поиска объекта с активацией подписки на топики ROS (рис. 4, *a*), запуск посылки стандартного сообщения ROS типа POSE (рис. 4, *b*), обработка этого сообщения и запуск миссии «Идти в точку» (рис. 4, *c*).

Заключение. В данной работе представлен подход к созданию интеллектуального планировщика миссий для автономных необитаемых подводных аппаратов. Ключевой особенностью предложенного решения является декларативный подход к созданию интеллектуального планировщика миссий с использованием специализированного редактора, что исключает необходимость программирования каждой новой миссии. Такой подход реализован за счёт онтологического представления планов миссий и единого интерпретатора, управляемого онтологическими моделями.

Предложенная архитектура программного продукта обеспечивает модульность и масштабируемость решений, позволяя адаптировать систему для различных классов автономных необитаемых подводных аппаратов и типов выполняемых миссий. Предварительный анализ работы интеллектуального планировщика миссий (реализован прототип программного комплекса) демонстрирует, что автоматизация процессов планирования и оптимизации ресурсов обеспечивает эффективное выполнение типовых задач автономных необитаемых подводных аппаратов. При этом использование онтологического подхода значительно сокращает время подготовки новых миссий и повышает гибкость системы.

Дальнейшее развитие планировщика будет направлено на совершенствование алгоритмов работы менеджера миссий, расширение онтологических моделей, углублённую интеграцию с другими компонентами бортового программного обеспечения автономных необитаемых подводных аппаратов.

Таким образом, представленная разработка вносит значительный вклад в развитие методов эффективного управления АНПА, предлагая инновационный декларативный подход к созданию систем планирования миссий. Предложенное решение может быть успешно использовано при проектировании перспективных робототехнических систем для морских исследований и выполнения различных технологических операций под водой.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Aldhaheri S., de Masi G., Pairet È., Ardón P.** Underwater Robot Manipulation: Advances, Challenges and Prospective Ventures // *Proc. of the OCEANS 2022 — Chennai*. Chennai, India, 21–24 Febr., 2022. DOI: 10.1109/OCEANSCennai45887.2022.9775489.
2. **Sahoo A., Dwivedy S. K., Robi P. S.** Advancements in the field of autonomous underwater vehicle // *Ocean Eng.* 2019. **181**. P. 145–160.
3. **Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Тимошенко А. А.** Особенности выполнения технологических операций с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов, оснащаемых многозвенными манипуляторами // *Вестн. Дальневосточного отделения РАН*. 2024. № 3 (235). С. 165–177.
4. **Antonelli G.** Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems. Berlin—Heidelberg: Springer, 2003. 268 p.
5. **Azar A. T., Koubaa A.** Artificial Intelligence for Robotics and Autonomous Systems Applications. Cham: Springer, 2023. 486 p.
6. **Kirchner F., Straube S., Kühn D., Hoyer N.** AI Technology for Underwater Robots. Cham: Springer, 2020. 193 p.
7. **Машошин А. И.** Технологии искусственного интеллекта в задачах управления автономным необитаемым подводным аппаратом // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2022. **23**, № 11. С. 596–606.
8. **Петров А. А.** Активное формирование моделей проблемной среды оцувствленными роботами. М.: Ин-т проблем передачи информации РАН, 1997. 229 с.
9. **Simetti E., Campos R., Vito D. D. et al.** Sea Mining Exploration With an UVMS: Experimental Validation of the Control and Perception Framework // *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 2021. **26**, N 3. P. 1635–1645.
10. **Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А.** Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве. Владивосток: Дальнаука, 2016. 400 с.
11. **Chen L., Liu Y., Dong P. et al.** An Intelligent Navigation Control Approach for Autonomous Unmanned Vehicles via Deep Learning-Enhanced Visual SLAM Framework // *IEEE Access*. 2023. **11**. P. 119067–119077.
12. **Lin J., Liang T., Ma G. et al.** Research on SLAM Intelligent Robot Based on Visual Laser Fusion // *Proc. of the 8th Int. Conf. on Control, Robotics and Cybernetics (CRC)*. Changsha, China, 22–24 Dec., 2024. DOI: 10.1109/CRC60659.2023.10488663.
13. **Борейко А. А., Инзарцев А. В., Машошин А. И. и др.** Система управления АНПА большой автономности на базе мультиагентного подхода // *Подводные исследования и робототехника*. 2019. № 2 (28). С. 23–31.
14. **Ferri G., Faggiani A., Celi F. et al.** Exploiting Behaviour Trees in Underwater Autonomous Robotic Networks // *Proc. of the OCEANS 2024 — Singapore*. Singapore, 15–18 April, 2024. DOI: 10.1109/OCEANS51537.2024.10682233.
15. **Han S., Zhao J., Li X. et al.** Online Path Planning for AUV in Dynamic Ocean Scenarios: A Lightweight Neural Dynamics Network Approach // *IEEE Trans. Intell. Vehicles*. 2024. **9**, Iss. 2. P. 3782–3795. DOI: 10.1109/TIV.2024.3356529.
16. **Machine Learning Applications: From Computer Vision to Robotics.** Eds. I. Chatterjee, S. Zalte. Wiley-IEEE Press, 2024. 240 p.
17. **Guo J., Li D., He B.** Intelligent Collaborative Navigation and Control for AUV Tracking // *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2021. **17**, Iss. 3. P. 1732–1741.

18. **Liu X.-F., Fang Y., Zhan Z.-H. et al.** A Cooperative Evolutionary Computation Algorithm for Dynamic Multiobjective Multi-AUV Path Planning // IEEE Trans. Ind. Inform. 2024. **20**, Iss. 1. P. 669–680. DOI: 10.1109/TII.2023.3268760.
19. **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. **2021**. 111. DOI: 10.1186/s13634-021-00817-4.
20. **Li X., Xu S.** Multi-Sensor Complex Network Data Fusion Under the Condition of Uncertainty of Coupling Occurrence Probability // IEEE Sensors Journal. 2021. **21**, Iss. 22. P. 24933–24940.
21. **Инзарцев А. В., Грибова В. В., Клецёв А. С.** Интеллектуальная система для формирования адекватного поведения автономного подводного робота в аварийных ситуациях // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2(20). С. 4–11.
22. **Gribova V., Moskalenko P., Timchenko V., Shalfeyeva E.** Intelligent Services Development Technology Using the IACPaaS Cloud Platform // Commun. Comp. and Inform. Sci. 2022. **1625**. P. 19–38.

Поступила в редакцию 07.08.2025

После доработки 30.09.2025

Принята к публикации 07.11.2025
