

ОБЗОР МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

И.В. Алферова

iraalfyorova@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Выполнен обзор существующих методов управления группой автономных необитаемых подводных объектов (АНПА). Изучены особенности движения подводного беспилотного аппарата. Проанализированы различные архитектуры мультиагентных систем. Выделен критерий классификации методов управления группой АНПА — протоколы управления. В соответствии с этим критерием методы были распределены по трем категориям: с централизованной координирующей формой управления, децентрализованной и гибридной. Перечислены преимущества и недостатки каждой из форм управления. Методы, в которых применяется децентрализованная форма управления, в свою очередь, также были подразделены на несколько подгрупп: структура «следование за лидером»; виртуальная структура; подходы, основанные на поведении; подходы, основанные на искусственном потенциальном поле и др. Проведен сравнительный анализ рассматриваемых методов. Сделан вывод о том, что выбор используемой архитектуры зависит от условий конкретной задачи, поскольку преимущества, которыми обладает каждый из методов, могут быть использованы для решения определенных задач.

Ключевые слова: навигация, управление движением, автономный необитаемый подводный аппарат, архитектура мультиагентной системы управления, акустическое позиционирование

Введение. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются одними из наиболее перспективных средств изучения и освоения Мирового океана [1]. При достижении современного уровня развития информационных технологий АНПА способны, не подвергая риску личный состав, эффективно решать целый ряд важных задач, в число которых входят поиск полезных ископаемых на морских шельфах, доставка грузов в труднодоступные районы, прокладка подводных линий связи, поиск затонувших кораблей и самолетов, экологический мониторинг Мирового океана, исследование морской флоры и фауны, проведение подводных археологических исследований [2].

Современные АНПА оснащены комплексом систем и устройств, обеспечивающих самостоятельное движение аппаратов под водой. Управление осуществляется автономно по программе, заложенной в память бортовой ЭВМ, с использованием инерциальной навигационной системы (ИНС) и доплеров-

ского лага с периодическим уточнением (при подвсплытии) местоположения по данным спутниковой радионавигационной системы (СРНС). Внедрение таких технологий позволяет АНПА уже сегодня занять важное место в структуре разведывательно-информационной системы освещения подводной обстановки.

Автономный мобильный робот должен выполнять неповторяющиеся задачи в несовершенной известной среде, нежелательной и даже враждебной [3]. В этих условиях миссии, возлагаемые на подводный аппарат, не могут быть точно определены, и этот аппарат должен анализировать обстановку, принимать решения о соответствующих действиях и реагировать на асинхронные события. Кроме того, он должен постоянно перенастраиваться для адаптации к внешним условиям и задачам.

Однако по мере роста сложности миссий достичь удовлетворительного результата с помощью одной системы АНПА становится практически невозможно. Как следствие, наряду с недавними достижениями теории многоагентных систем за последние несколько десятилетий в сообществах управления и океанологии большое внимание уделялось разработкам нескольких автономных систем подводных аппаратов [2, 4, 5]. Организовав группу АНПА, гораздо легче справиться с большим количеством трудностей [6]. Кроме того, многоагентная система обладает многими полезными свойствами, включая высокую степень гибкости, простоту расширения и обслуживания, а также повышенную устойчивость к возмущениям, отказам и др.

К настоящему времени сформировалось множество стилей мультиагентных архитектур [7], преимущественно в области организации производства и разработки программного обеспечения. В связи с этим целью данной работы является структурирование существующих методов управления группой АНПА и их классификация в соответствии с выделенными критериями.

Особенности движения подводного беспилотного аппарата. Одна из ключевых проблем — создание эффективной системы управления, назначением которой является максимально точное выполнение маршрутного задания, загруженного в ее память до начала миссии [5]. Маршрутное задание представляет собой разработанный человеком-оператором набор формализованных инструкций, привязанных ко времени и географическим координатам, точное и своевременное выполнение которых позволит достичь цели миссии. Выполнение АНПА маршрутного задания под руководством системы управления не вызывало бы больших трудностей, если бы не препятствующие обстоятельства. Опыт применения АНПА показывает, что эти обстоятельства сопутствуют практически каждой миссии и обусловлены как внешними, так и внутренними факторами. К внешним факторам относятся:

отклонение АНПА от заданного маршрута, обусловленное влиянием внешних факторов и ошибками навигации; появление подводных объектов, столкновения с которыми нужно избежать; обнаружение неподвижных препятствий (подводных хребтов и др.), не нанесенных на навигационную карту, которые нужно обойти; непредвиденное изменение скорости и/или направления течения, приводящее к необходимости изменять параметры движения АНПА; изменение границ ледового покрова, препятствующее всплытию для обсервации в назначенное время.

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

Парирование перечисленных негативных факторов является нетривиальной задачей даже для человека, поскольку для принятия в сложившейся ситуации эффективного решения, обеспечивающего достижение цели миссии, нужно учесть как возникшие негативные факторы, так и ограничения по запасу электроэнергии, скорости хода, точности автономной навигации, дальности гидроакустической связи. Для решения этой задачи система управления АНПА должна реализовывать сложные адаптивные алгоритмы, базирующиеся на технологиях искусственного интеллекта.

Система управления АНПА относится к системам управления наивысшей сложности, что обусловлено необходимостью управлять в реальном времени большим количеством разнородных технических средств и при этом функционировать в полностью автоматическом режиме в непрерывно изменяющейся внешней (зачастую агрессивной) среде при ограниченных возможностях автономной подводной навигации и связи с пунктом управления. Подходам к созданию системы управления АНПА посвящено большое число публикаций как в России [2, 7, 8], так и за рубежом [3, 9], по мере развития подводной робототехники поток этих публикаций постоянно нарастает.

Большинство существующих доступных исследований по формированию АНПА в основном посвящены методам управления движением и стратегиям координации формирования и слабо затрагивают проблемы коммуникации, которые, как упоминалось, жизненно важны для обеспечения АНПА надежной работы в подводных условиях.

Протоколы управления группой АНПА. Для достижения поставленной перед группой АНПА цели необходим соответствующий протокол управления формированием для эффективной координации движений АНПА. В целом стратегии многоагентной координации можно условно подразделить на три формы в зависимости от используемой информации: централизованную координацию, децентрализованную и гибридную координацию [4].

В централизованной форме управляющие команды или управляющие действия каждого АНПА планируются с помощью процедуры центрального управления, которая обеспечивает доступ к глобальной информации всей управляющей системы. Напротив, в децентрализованной структуре нет контролера, планирующего действия для каждого АНПА в группе, и вместо этого АНПА принимают свои собственные решения, основываясь на имеющейся у них местной информации. Гибридная форма совмещает в себе особенности централизованной и децентрализованной структур.

Централизованная координирующая структура управления. В централизованных архитектурах [4], структура которых показана на рис. 1, центральный агент располагает глобальной информацией обо всех АНПА и окружающей среде. Глобальная информация (например, местоположение и скорость АНПА, расположение препятствий) собирается датчиками АНПА. Чтобы заставить рой АНПА сохранять заданную форму, избегать препятствий и прибывать в пункт назначения, центральный агент обрабатывает глобальную информацию и определяет процесс принятия решений [10]. Затем центральный агент передает командные сигналы на каждый АНПА, в то время как каждый АНПА передает информацию о своем состоянии центральному агенту (например, ведущему АНПА) в качестве обратной связи [11].

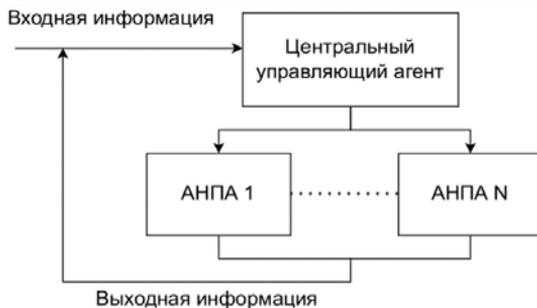


Рис. 1. Централизованная архитектура

Стратегии централизованного управления могут реализовывать единоначальное или иерархическое управление. При единоначальном управлении имеется центральное управляющее устройство, отдающее команды роботам группы. При иерархическом управлении имеется дерево иерархии управляющих устройств [6].

В случае если весь набор заданий известен заранее, может быть применено предварительное централизованное планирование. Так, в работе [12] рассмотрена задача распределения неподвижных целей внутри группы летатель-

ных аппаратов. Необходимо посетить все цели, минимизировав функционал, который представляет собой взвешенную сумму максимального и суммарного времени, затраченного всеми роботами. Задача сформулирована в терминах целочисленного программирования, предложены точный и приближенный методы решения задачи. В системе ALLIANCE [13] рассмотрено распределение заданий в группе разнородных роботов. Применены алгоритмы, основанные на «жадном» подходе, в котором каждый раз среди невыполненных заданий выбирается то, которое потребует наибольших или наименьших затрат. В развитии этой системы, версии L-ALLIANCE, используется механизм машинного обучения, предназначенный для учета различий в способностях роботов. Специфика водной среды заключается в низкой пропускной способности систем связи, поэтому при составлении групповых алгоритмов важно это учесть. Для некоторых коллективных методов требуется, например, передача сообщений между членами группы по цепочке, что затруднительно в случае перебоев связи.

В работе [14] также рассмотрена централизованная система управления командой подводных аппаратов. Основным элементом системы является управляющий агент (УА), который генерирует решения для каждого подводного аппарата в виде желаемых значений их курсов: ψ_1^{set} , ψ_2^{set} , ψ_3^{set} (учитывается движение транспортных средств по горизонтальной поверхности). Управляющий агент принимает решения на основе информации о местоположении всех транспортных средств на горизонтальной поверхности x и их курсах (например, УА получает следующую информацию о транспортном средстве номер 1: x_1 , y_1 , ψ_1). Дополнительным элементом системы служит подсистема мониторинга, в которой используются датчики подводного мониторинга (например, гидролокатор) для получения и передачи в УА информации о местоположении подводных объектов (например, спасающегося транспортного средства в задаче «хищник — жертва»).

Децентрализованная координирующая структура управления. Децентрализация управления роботами становится эффективной с увеличением числа роботов [15], поскольку имеется компромисс между децентрализацией, влекущей неоптимальность решения с одной стороны, и централизацией, требующей вычислительных ресурсов и наличия связи со всеми членами группы — с другой стороны. Схема такой архитектуры представлена на рис. 2.

Следование за лидером. Структура следования за лидером является одной из наиболее популярных схем [9], используемых для управления формированием многоагентных систем, благодаря ее простому описанию [16]. В такой схеме один или несколько агентов выбираются в качестве лидеров, а остальные агенты группируются в последователей (рис. 3).



Рис. 2. Децентрализованная координирующая структура управления

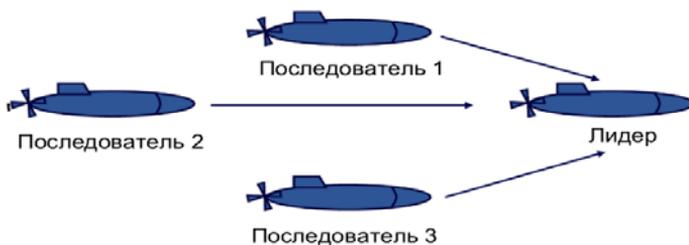


Рис. 3. Типичная топология структуры «лидер — последователь»

Сигнал о желаемой цели известен только лидерам, и в обычной структуре следования за лидером цель лидеров состоит в том, чтобы просто отслеживать эту предписанную цель, и нет явного взаимодействия между агентами, которые следуют за ними. Единственная цель последователей состоит в том, чтобы сохранить желаемое относительное положение (т. е. позицию и направление движения) по отношению к своим ведущим агентам. Таким образом, цель контроля формирования может быть достигнута, если достигнута цель каждого транспортного средства. Основные преимущества такого метода заключаются в том, что его легко внедрить и можно достаточно гибко добавлять или удалять транспортные средства из группы.

Однако такой подход страдает серьезным недостатком: эффективность всей системы управления в значительной степени зависит от поведения лидеров и качества коммуникации. Другими словами, как только ведущие агенты или коммуникационная сеть перестают работать в обычном режиме из-за непредсказуемых сбоев, что часто имеет место в подводных условиях, вся си-

стема управления может быть отключена. Для устранения этой проблемы и повышения надежности подхода, основанного на следовании за лидером, предложено применять метод, основанный на виртуальном лидере, в котором нет физических средств, используемых для руководства группой [17]. Типичная структура формирования на основе виртуального лидера представлена на рис. 4.

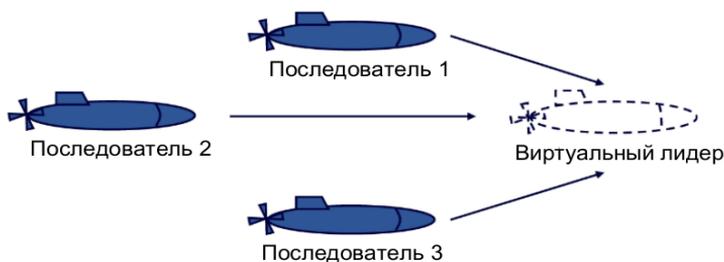


Рис. 4. Типичная топология структуры виртуального лидера

Другим важным соображением, касающимся такого типа структуры, является то, что всегда предполагается, что каждому транспортному средству в группе разрешено получать информацию о траектории виртуальных лидеров, что служит сильным ограничением и может не выполняться во многих реальных приложениях.

Виртуальная структура. Координация виртуальной структуры является еще одним распространенным методом, используемым для координации мультиагентного формирования, о котором впервые сообщалось в [18] при решении проблемы совместного управления несколькими мобильными роботами. Применение этого метода базируется на наборе виртуальных точек, соответствующих каждому транспортному средству, который определяется желаемой конфигурацией формирования, а также траекторией, подлежащей отслеживанию. Поскольку каждому транспортному средству назначается своя собственная контрольная точка, задача отслеживания управления преобразуется в соответствующую задачу управления отслеживанием, цель которой состоит в управлении транспортными средствами таким образом, чтобы свести к минимуму различия между их фактическими и желаемыми позициями. Типичная реализация такого подхода проиллюстрирована на рис. 5.

Метод координации виртуальной структуры также прост в анализе и реализации, поэтому на сегодняшний день с помощью этого метода уже получены результаты, гарантирующие выполнение требований к системе управления группой АНПА [19].

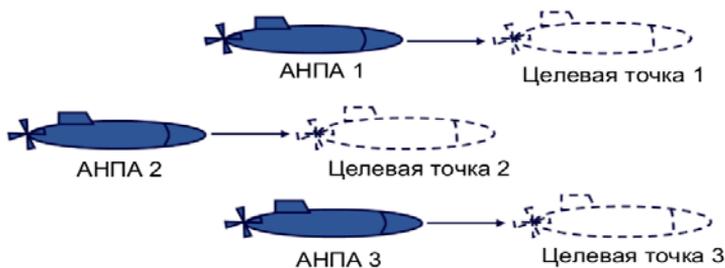


Рис. 5. Типичная топология виртуальной структуры

Подходы, основанные на поведении. В отличие от двух описанных выше методов, в системах формирования, синтезированных с использованием подхода координации, основанного на поведении (рис. 6), существует явная взаимная связь.

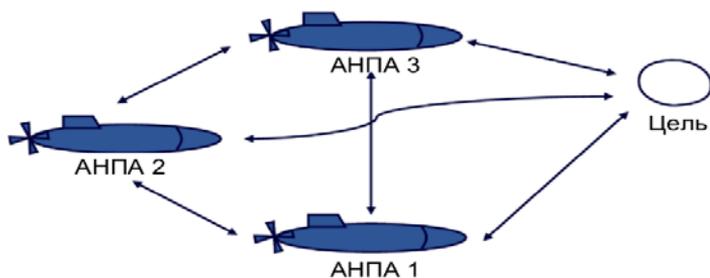


Рис. 6. Типичная топология подхода, основанного на поведении

Вместо прямого предписания априорных эталонных траекторий при подходе, основанном на поведении, при построении априорных эталонных траекторий каждое транспортное средство в группе принимает свои собственные решения на основе локальной информации (например, своих собственных состояний, окружения и состояний соседей) и predeterminedенных целей.

Цели обычно включают достижение контрольной точки, избегание столкновения или препятствия, поддержание дистанции и т. д. В частности, общие управляющие воздействия транспортных средств формируются на основе взвешенной комбинации достижения этих различных целей. Благодаря многоцелевым и распределенным особенностям подход, основанный на поведении, привлек большое внимание за последние несколько десятилетий в областях исследований мультиагентного сотрудничества и координации [20].

Хотя оказалось, что схема, основанная на поведении, способна достигать множества целей и зависит от ограниченной локальной информации для рас-

чета управляющих воздействий, трудно проанализировать свойства устойчивости всей системы формирования на основе такого метода, когда задействовано больше транспортных средств и моделей поведения. Это значительно ограничивает его практическое применение.

Подходы, основанные на искусственном потенциальном поле. Подход к искусственному потенциальному полю (APF) впервые был изобретен Хатибом [21] для разработки алгоритма генерации маршрута без препятствий для планирования траектории манипулятора и мобильного робота.

Основная особенность метода заключается в том, что ряд искусственных потенциальных функций определяется намеренно с целью достижения цели и в то же время избегания препятствий. Аналогично потенциальной энергии в физике, определенные функции APF также могут генерировать соответствующие потенциальные силы.

Как правило, задействованы два типа функций APF: одна направлена на создание потенциальных сил притяжения, чтобы приблизить транспортные средства к целям, а другая пытается создать потенциальные силы отталкивания, чтобы заставить транспортные средства держаться подальше от препятствий (рис. 7). Как следствие, при воздействии как сил притяжения, так и сил отталкивания предписанная цель может быть достигнута. На основе такой формулировки, имеющей четкое физическое значение, подход APF также внедряют в различные многоагентные системы, чтобы помочь организовать сотрудничество и координацию [22].

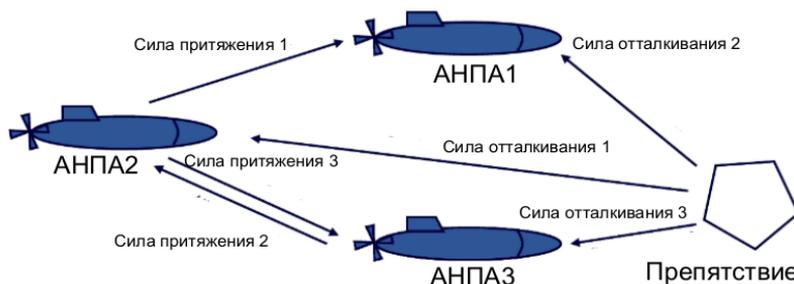


Рис. 7. Типичная топология подхода, основанного на APF

Подобно подходу, основанному на поведении, подход APF относительно прост в синтезе распределенных агентов, которые достигают множества целей, зависящих только от локальной информации. Однако одним из основных недостатков является то, что он может попасть в точки, в которых результирующая суммарная сила, приложенная к транспортным средствам, равна нулю (эту ситуацию также называют проблемой локальных миниму-

мов). Аналогичным образом, анализ стабильности мультиагентных систем на основе APF также является непростой задачей по сравнению с подходами структуры «лидер — последователь» и виртуальной структуры, когда масштаб группы становится больше.

Судя по результатам всестороннего обзора литературы, существуют некоторые другие широко используемые подходы к достижению многоагентного сотрудничества и координации, однако такого рода схемы можно, в некотором смысле, рассматривать как варианты уже представленных.

Гибридная координирующая структура управления. В случае гибридной системы (рис. 8) были разработаны два агента принятия решений: центральный УА и вспомогательный УА. Центральный УА отвечает за генерацию решений для АНПА 1, АНПА 2 и УА В, в то время как вспомогательный отвечает за управление движением двух других кэширующих транспортных средств 3 и 4.

Гибридная система может быть преобразована в централизованную систему в результате соединения двух агентов принятия решений в один УА, генерирующий решения для АНПА 1, 2, 3 и 4. Эта система также может быть преобразована в децентрализованную систему в результате разделения агентов принятия решений на четыре УА.

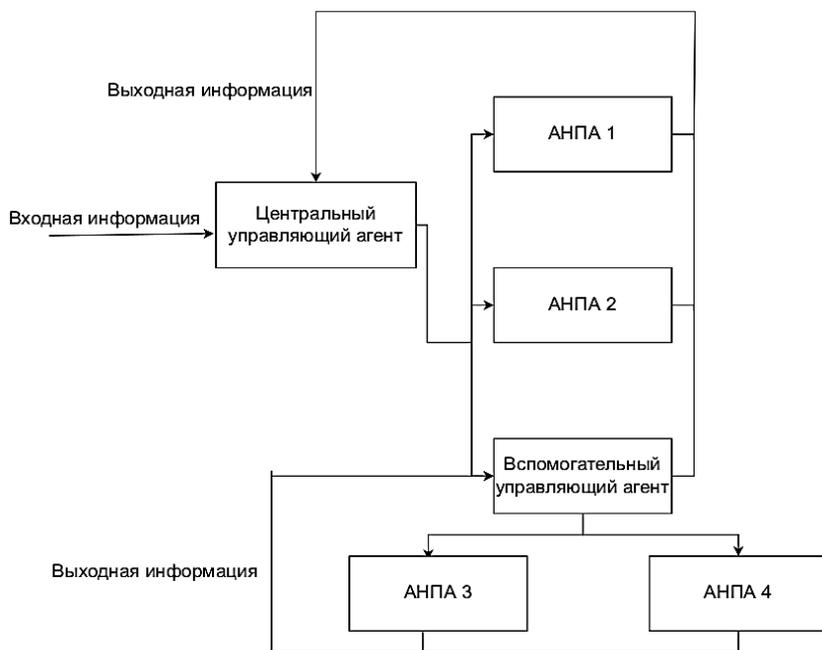


Рис. 8. Гибридная координирующая структура управления

Сравнительный анализ. Основным преимуществом централизованных архитектур является простота реализации, в то время как к недостаткам относятся слабая надежность по отношению к неисправности центрального агента, недостаточная масштабируемость из-за ограничения пропускной способности каналов связи. Преимущества децентрализованных архитектур включают лучшую надежность и масштабируемость по сравнению с централизованными архитектурами, совместное использование вычислительной мощности и обмена информацией между каждым АНПА. Преимущество стратегий следования за лидером заключается в том, что конструкции агентов просты, поскольку все движение формирования определяется лидером или лидерами. Недостатком является то, что эти стратегии недостаточно надежны, поскольку последователи не общаются друг с другом. Если лидер терпит неудачу, то терпит неудачу вся формация. Преимущество стратегий, основанных на поведении, заключается в обмене АНПА небольшими объемами информации. Их недостатки обусловлены тем, что разработка базовых моделей поведения и планирование локального контроля затруднены, нельзя гарантировать высокую стабильность управления формой группы АНПА. Преимущества стратегий виртуальной структуры обеспечиваются тем, что скоординированное поведение АНПА легко поддается описанию, жесткая конструкция обладает хорошими характеристиками поддержания формы группы АНПА. Недостатком является сложность определения локальных минимумов искусственного потенциального поля. Стратегии использования искусственных потенциальных функций обладают рядом преимуществ, таких как простой расчет и простота реализации управления в режиме реального времени. Недостатком является то, что найти локальное минимальное значение достаточно сложно.

Заключение. Проведенный сравнительный анализ архитектур управления группировками АНПА позволил выявить ключевые преимущества и недостатки различных подходов.

1. Централизованные архитектуры обеспечивают простоту реализации, но обладают низкой надежностью и ограниченной масштабируемостью из-за зависимости от центрального агента и пропускной способности каналов связи.

2. Децентрализованные архитектуры демонстрируют более высокую надежность и масштабируемость за счет распределенных вычислений и обмена информацией между аппаратами.

3. Стратегии следования за лидером просты в реализации, но уязвимы к отказу лидера, что может привести к потере управления всей группировкой.

4. Поведенческие стратегии позволяют минимизировать объем передаваемых данных, однако требуют сложной разработки базовых моделей поведения и не гарантируют стабильности управления.

5. Стратегии виртуальной структуры обеспечивают четкое описание группового поведения и хорошую поддержку формы, но сталкиваются с проблемой локальных минимумов потенциальных полей.

В результате проведенного обзора установлено, что выбор используемой архитектуры зависит от условий конкретной задачи, поскольку каждый из методов имеет преимущества, которые могут быть использованы для решения определенных задач.

Литература

- [1] Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В. и др. *Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение*. Владивосток, Институт проблем морских технологий ДВО РАН, 2018, 368 с.
- [2] Аллакулиев Ю.Б., Емелин В.И. Постановка проблемы управления автономными необитаемыми подводными аппаратами и формирование путей ее решения. *Системы управления, связи и безопасности*, 2018, № 4, с. 110–120.
- [3] Sayouti A., Medromi H. Multi-agent systems and its application to control vehicle underwater. *International Journal of Applied Information Systems*, 2015, vol. 9, no. 7. <https://doi.org/10.5120/ijais2015451435>
- [4] Yue Yang, Yang Xiao, Tieshan Li. A Survey of Autonomous Underwater Vehicle Formation: Performance, Formation Control, and Communication Capability. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2021, vol. 23, iss. 2, pp. 815–841. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3059998>
- [5] Быкова В.С., Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В. Алгоритмы функционирования мультиагентной системы управления автономным необитаемым подводным аппаратом. *Информационные технологии в управлении. 13-я Мультиконференция по проблемам управления: сб. тр.* Санкт-Петербург, ГНЦ РФ АО Концерн ЦНИИ Электроприбор, 2020, с. 187–191.
- [6] Туфанов И.Е. *Методы решения обзорно-поисковых задач с применением групп автономных необитаемых подводных аппаратов*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Владивосток, 2014, 21 с.
- [7] Мартынова Л.А. Киселев Н.К., Мысливый А.А. Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 4, с. 31–41. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-4-31-41>
- [8] Ложкин К.В. Исследование способов прокладки маршрута движения подводного беспилотного аппарата. *Столыпинский вестник*, 2020, № 2, с. 489–495.
- [9] Liang Li Yiping Li, Yuexing Zhang, Gaopeng Xu, Junbao Zeng. Formation Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles under Communication Delay, Packet Discreteness and Dropout. *Marine Science and Engineering*, 2022, vol. 10, no. 7. <https://doi.org/10.3390/jmse10070920>

- [10] Yamashita A., Arai T., Ota J. Motion planning of multiple mobile robots for cooperative manipulation and transportation. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 2003, vol. 19, no. 2, pp. 223–237. <https://doi.org/10.1109/tra.2003.809592>
- [11] Burlutskiy N., Touahmi Y. Power efficient formation configuration for centralized leader-follower AUVs control. *J. Marine Sci. Technol.*, 2012, vol. 17, pp. 315–329. <https://doi.org/10.1007/s00773-012-0167-0>
- [12] [Ge X. et al. Distributed formation control of networked multi-agent systems using a dynamic event-triggered communication mechanism. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2017, vol. 64, iss. 10. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2701778>
- [13] Shi Q., Li T., Li J., Chen C.P., Xiao Y. Adaptive leader-following formation control with collision avoidance for a class of second-order nonlinear multi-agent systems. *Neurocomputing*, 2019, vol. 350. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.03.045>
- [14] Szymak P. Comparison of Centralized, Dispersed and Hybrid Multiagent Control Systems of Underwater Vehicles Team. *Solid State Phenomena*, 2011, vol. 180, pp. 114–121. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.180.114>
- [15] Zeng Y., Zhang R. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Commun. Mag.*, 2016, vol. 54, iss. 5, pp. 36–42. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470933>
- [16] Oh K.K., Park M.C., Ahn H.S. A survey of multi-agent formation control. *Automatica*, 2015, vol. 53, pp. 424–440. <https://doi.org/10.1016/J.AUTOMATICA.2014.10.022>
- [17] Shi H., Wang L., Chu T. Virtual leader approach to coordinated control of multiple mobile agents with asymmetric interactions. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2006, vol. 213 (1), pp. 6250–6255. <https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1583163>
- [18] Tan K.H., Lewis M.A. Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control. *IROS'96*, IEEE, 1996, vol. 1, no. 4, pp. 132–139. <https://doi.org/10.1109/IROS.1996.570643>
- [19] Yuan C., Licht S., He H. Formation learning control of multiple autonomous underwater vehicles with heterogeneous nonlinear uncertain dynamics. *IEEE Trans Cybern.*, 2018.
- [20] Hacene N., Mendil B. Behavior-based autonomous navigation and formation control of mobile robots in unknown cluttered dynamic environments with dynamic target tracking. *Int. J Autom Comput.*, 2021, vol. 18, pp. 766–786. <https://doi.org/10.1007/s11633-020-1264-x>
- [21] Khatib O. *Autonomous Robot Vehicles. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. Autonomous Robot Vehicles*. New York, Springer, 1990.
- [22] Ying Z., Xu L. Leader-follower formation control and obstacle avoidance of multi-robot based on artificial potential field. *The 27th Chinese Control and Decision Conference*. Qingdao, China, IEEE, 2015. <https://doi.org/10.1109/ccdc.2015.7162695>

Поступила в редакцию 20.05.2025

Алферова Ирина Викторовна — студентка кафедры «Информатика и системы управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Кивва Кирилл Андреевич, старший преподаватель кафедры «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана Москва, Российская Федерация. SPIN-код: 6353-0017; e-mail: k.kivva@bmstu.ru

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алферова И.В. Обзор методов управления группой автономных необитаемых подводных объектов. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 06 (101). URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/icec/inf_tech/1082.html

CLASSIFICATION OF METHODS FOR MANAGING A GROUP OF AUTONOMOUS UNINHABITED VEHICLES

I.V. Alferova

iraalfyorova@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

An overview of existing methods for managing a group of AUVs has been conducted. The specifics of underwater navigation have been studied. Requirements for a group of AUVs that the system must meet to accomplish the set tasks have been formulated. An analysis of various architectures of multi-agent systems has been carried out. A criterion for classifying methods for managing a group of AUVs has been identified — management protocols. According to this criterion, existing methods have been categorized into three categories: centralized coordinating form of management, decentralized, and hybrid. The advantages and disadvantages of each have been named. Methods using a decentralized form of management have, in turn, also been classified into several subgroups: “leader-following” structure; virtual structure; approaches based on behavior; approaches based on artificial potential field, and others. A comparative analysis of the methods under consideration has been conducted. It is concluded that the choice of the architecture used depends on the specific task conditions, as each method has advantages that can be used to solve specific tasks.

Keywords: navigation, autonomous uninhabited underwater vehicle, architecture of a multi-agent control system, acoustic positioning

Received 20.05.2025

Alferova I.V. — Student of Department of Computer Science and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Kivva K.A., Senior Lecturer, Department of Computer Software and Information Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. SPIN-code: 6353-0017; e-mail: k.kivva@bmstu.ru

Please cite this article in English as:

Alferova I.V. Classification of methods for managing a group of autonomous uninhabited vehicles. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 06 (101). URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/icec/inf_tech/1082.html