

В. С. БЫКОВА, Л. А. МАРТЫНОВА, А. И. МАШОШИН, И. В. ПАШКЕВИЧ  
АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург

## АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ

*Описана версия алгоритмов функционирования системы управления автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА), разработанных авторами. Алгоритмы базируются на мультиагентной структуре системы управления АНПА. Их отличие от известных алгоритмов заключается в принципах, заложенных в их основу и направленных на обеспечение универсальности алгоритмов, позволяющей использовать их в системах управления АНПА различного назначения.*

**Введение.** Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективным средством исследования и освоения Мирового океана [1–4].

Наиболее актуально применение АНПА в районах, покрытых льдом, а также на больших глубинах, недоступных для подводных лодок.

Вместе с тем, поскольку АНПА являются автономно действующими подводными роботами, их создание сопряжено с решением значительного количества научно-технических проблем. При этом одной из ключевых проблем является создание эффективной системы управления, назначением которой является максимально точное выполнение маршрутного задания, загруженного в её память до начала миссии. 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 [20].

Выполнение АНПА маршрутного задания под управлением системы управления больших трудностей не вызвало бы, если бы не препятствующие обстоятельства. Опыт применения АНПА показывает, что эти обстоятельства сопутствуют практически каждой миссии. И обусловлены они 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, столкновение с которыми нужно избежать;
- обнаружение неподвижных препятствий (подводных хребтов и др.), не нанесённых на навигационную карту, которые нужно обойти;
- непредвиденное изменение скорости и/или направления течения, вызывающие необходимость изменять параметры движения АНПА;
- изменение границ ледового покрова, что препятствует всплытию для обсервации в назначенное время.

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

Ситуация ещё более усложняется в условиях преднамеренного противодействия выполнению миссии, что имеет место при применении АНПА в специальных операциях.

Внутренними факторами, препятствующими выполнению маршрутного задания, являются неустраняемые неисправности аппаратной части АНПА и не восстанавливаемые сбои программного обеспечения, что также приводит к необходимости корректировки маршрутного задания, а в ряде случаев и к прекращению миссии.

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. И здесь возникает ещё одна проблема. Формализованных методик синтеза подобных алгоритмов на сегодняшний день не существует. Есть только общие рекоменда-

ции по принципам их построения. Такие алгоритмы во многом являются эвристическими, что переносит трудности с их разработки на их практическую отработку, а это противоречит сложившейся практике создания сложной техники.

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 [5–20], так и за рубежом [21–39] и по мере развития подводной робототехники поток этих публикаций постоянно нарастает.

Известно [22, 40, 41], что построить такую систему управления как централизованную (мультиобъектную), в которой система управления управляет всеми действиями всех технических средств АНПА, ввиду высокой сложности весьма затруднительно.

Для построения системы управления АНПА в наибольшей степени подходит децентрализованная мультиагентная структура.

При такой структуре каждая система АНПА является самостоятельным независимым интеллектуальным агентом с собственной системой управления. Управление движением АНПА и выполнением других функций осуществляется путём взаимодействия на основе равноправного общения всех систем-агентов. Система управления в такой структуре выступает в роли диспетчера, организующего выполнение маршрутного задания [20, 22].

Поскольку содержание большинства публикаций по системам управления АНПА ограничено изложением подходов и принципов построения систем управления АНПА, а сами алгоритмы управления являются коммерческой тайной, разработчики каждого АНПА вынуждены разрабатывать систему управления самостоятельно.

Целью работы является краткое изложение алгоритмов управления АНПА, разработанных авторами. Алгоритмы базируются на мультиагентной структуре системы управления АНПА. Их отличие от известных алгоритмов заключается в приведённых ниже принципах, заложенных в их основу и направленных на обеспечение универсальности алгоритмов, позволяющей использовать их в системах управления АНПА различного назначения.

Алгоритмы управления АНПА включают две группы – алгоритмы, реализуемые на этапе подготовки к миссии, и алгоритмы, реализуемые в процессе выполнения миссии. Для сокращения объёма доклада в ней рассматривается только вторая группа алгоритмов.

**Принципы построения алгоритмов управления АНПА.** Разработанные алгоритмы управления АНПА базируются на следующих принципах:

1) маршрутное задание, загружаемое в процессе подготовки к миссии в память системы управления, состоит из следующих формализованных документов:

- описание маршрута АНПА в виде последовательности галсов на протяжении всей миссии;
- описание поведения АНПА при выполнении специальной программы (как правило, это работа в назначенном районе);
- таблица констант, обеспечивающих работу алгоритмов управления АНПА;
- таблица, содержащая формализованное географическое, навигационно-гидрографическое и гидрометеорологическое описание района планируемого маршрута АНПА;
- таблица планового расхода электроэнергии при движении по заданному маршруту.

2) Учитывая, что на практике точное движение по маршруту как по времени, так и по координатам в силу возникающих непредвиденных обстоятельств, как правило, не представляется возможным, в описании маршрута указываются только ключевые параметры миссии: конфигурация маршрута, плановые обсервации и сеансы связи, координаты района, в котором должна быть проведена целевая работа, содержание этой работы. Детализация маршрутного задания возлагается на систему управления, которая должна планировать предстоящие действия АНПА с учётом целевой установки и сложившихся обстоятельств.

3) В процессе выполнения миссии АНПА может находиться в одном из следующих состояний:

- движение по маршруту в соответствии с маршрутным заданием;
- выполнение плановой обсервации одним из способов;

- расхождение с обнаруженным подвижным объектом;
- обход обнаруженного неподвижного препятствия;
- плановый сеанс связи по радиоканалу;
- выполнение специальной программы (в частности выполнение целевого задания в назначенном районе работы);
- аварийное прекращение миссии.

Все состояния ранжируются по приоритету. Если при нахождении АНПА в определённом состоянии возникают условия перехода в состояние с более высоким приоритетом, оно осуществляется, не дожидаясь нормального выхода из текущего состояния. Если же возникают условия перехода в состояние с более низким приоритетом, переход откладывается и осуществляется только после выхода из текущего состояния.

Данный подход существенно упрощает взаимодействие алгоритмов управления друг с другом.

4) Взаимодействие АНПА с пунктом управления осуществляется путём обмена формализованными сообщениями по радио- либо гидроакустическому каналу связи.

Пункт управления посылает АНПА сообщения двух типов:

- запрос текущего состояния АНПА;
- инструкции по изменению маршрутного задания в форме его фрагмента.

Формализованное сообщение, которое отправляет АНПА по запросу либо по собственной инициативе, содержит:

- код состояния АНПА;
- оставшийся запас электроэнергии;
- координаты АНПА;
- время последней обсервации;
- перечень условных номеров неисправных технических средств.

5) Для упрощения алгоритмов функционирования системы управления АНПА, всеми радиоэлектронными системами АНПА она управляет напрямую, а техническими средствами АНПА – через систему управления техническими средствами (СУТС) АНПА.

**Алгоритмическая структура системы управления АНПА.** Функционирование системы управления реализуется путём взаимодействия нескольких независимых алгоритмов управления:

- движением АНПА и организацией выполнения плановых заданий в соответствии с маршрутным заданием. Также данный алгоритм осуществляет контроль за расходом запаса электроэнергии с принятием мер при превышении расходом плановых значений и периодическую диагностику технического состояния АНПА в интересах определения готовности АНПА к продолжению выполнения маршрутного задания. Данный алгоритм является управляющим по отношению к остальным алгоритмам;
- проведением обсерваций;
- освещением обстановки в интересах обнаружения опасных подвижных объектов и неподвижных препятствий;
- расхождением с подвижными объектами;
- обходом неподвижных препятствий;
- проведением сеансов связи;
- аварийным прекращением миссии;
- выполнением специальных программ;
- нормальным завершением миссии.

Все перечисленные алгоритмы реализуются независимыми асинхронно функционирующими программами, обменивающимися с алгоритмом управления движением и при необходимости друг с другом формализованными информационными модулями.

В процессе выполнения маршрутного задания система управления АНПА взаимодействует с другими системами АНПА, точнее с их системами управления, являющимися агентами в мультиагентной структуре управления АНПА. Взаимодействие осуществляется путём выдачи системам АНПА команд и при необходимости данных для их выполнения и получения докладов о результатах выполнения команд. Взаимодействие осуществляется с использованием формализованных информационных модулей. Для взаимодействия системы управления с каждой конкретной системой АНПА используется 2 информационных модуля: один для передачи

данных в направлении «система управления → система АНПА», другой для передачи данных в обратном направлении. Следует заметить, что, благодаря мультиагентной структуре управления АНПА, информационные модули содержат весьма ограниченный набор команд и данных.

В полном тексте доклада приводится описание алгоритмов управления АНПА, а также иллюстрация их работы на примере конкретной миссии.

**Заключение.** Создание эффективной системы управления АНПА является главной проблемой в развитии подводной робототехники. Работы в данном направлении ведутся во многих развитых странах мира. Однако, несмотря на это, на сегодняшний день приходится констатировать, что проблема ещё далека до окончательного решения. И работы по созданию алгоритмов, реализуемых в системах управления АНПА необходимо продолжать.

В докладе описана версия алгоритмов управления АНПА, разработанная авторами. Алгоритмы базируются на мультиагентной структуре системы управления АНПА. В основу алгоритмов положены принципы, обеспечивающие их универсальность, что позволит использовать разработанные алгоритмы в системах управления АНПА различного назначения.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00253)*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М.: Наука, 2005, 400 с.
2. Инзарцев А.В. и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. №2 (4). С.5-14.
3. Боженков Ю.А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4, №1. С.4-68.
4. Millar G., Mackay L. Maneuvering Under the Ice // Sea Technology. 2015. V.56. No. 4. P.35-38.
5. Киселёв Л.В., Костоусов В.Б., Медведев А.В., Тарханов А.Е. О гравиметрии с борта автономного подводного робота и оценках её информативности для навигации по карте // Подводные исследования и робототехника, 2019, №1(27), с.21-30.
6. Моргунов Ю.Н., Каменев С.И., Безответных В.В., Петров П.С. Исследование возможности позиционирования АНПА при выполнении ими глубоководных миссий // Подводные исследования и робототехника, 2019, №1(27), с.48-54.
7. Инзарцев А.В., Павин А.М. Язык планирования миссии на основе стандарта GeoJSON // Подводные исследования и робототехника, 2019, №2(28), с.32-40.
8. Кебкэл К.Г. и др. Гидроакустические модемы с интегрированными цезиевыми часами для задач подводного позиционирования АНПА // Подводные исследования и робототехника, 2019, №2(28), с.4-12.
9. Кирьянов А.В., Бабкин Д.С., Хан Р.Е. Решения задач передачи информации и электропитания на АНПА и гидроакустические маяки ответчики // МРЭ, 2019, № 1(67), с.6-8.
10. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Дубина В.А., Лучин В.А. Методология применения океанологических данных для высокоточной обсервации подводных объектов на большой дальности // Подводные исследования и робототехника, 2018, №2(26), с.49-54.
11. Спорышев М.С., Щербатюк А.Ф. Об использовании групп морских роботов для охраны водных акваторий: краткий обзор // Подводные исследования и робототехника, 2018, №2(26), с.21-27.
12. Кирьянов А.В. Организация централизованного управления движением строя разведывательно-поисковой группы АНПА // МРЭ, 2018, №2 (64), с.2-6.
13. Опарин А.И., Печников А.Н. О некоторых проблемах формирования и применения группировок разнородных мобильных робототехнических комплексов и подходах к их решению. // Подводные исследования и робототехника, 2017, №1 (23), с.14-22.
14. Инзарцев А.В., Павин А.М., Лебедко О.А., Панин М.А. Распознавание и обследование малоразмерных подводных объектов с помощью АНПА. // Подводные исследования и робототехника, 2016, №2 (22), с.25-43.
15. Кирьянов А.В. Принципы организации инфокоммуникационной сети в группе АНПА. // Морская радиоэлектроника, 2017, №2 (60), с.22-25.
16. Пшихопов В.Х., Сиротенко М.Ю., Гуренко Б.В. Структурная организация систем автоматического управления подводными аппаратами для априори неформализованных сред // Информационно-измерительные и управляющие системы. Интеллектуальные и адаптивные роботы. 2006. Т.4, № 1-3. С.73-79.
17. Ермолов И.Л. Расширение функциональных возможностей мобильных технологических роботов путем повышения уровня их автономности с использованием иерархической комплексной обработки бортовых данных. Дис. ... докт. техн. наук, 2012, 350 с.
18. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И. Система управления – наиболее сложная часть автономных необитаемых подводных аппаратов // Морская радиоэлектроника. 2015. №4 (54). С. 23-32.
19. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И. Интегрированная система управления автономного необитаемого подводного аппарата // Материалы 8-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления, Дивноморское, 28 сентября – 3 октября 2015г. Т.3. С.191-193.
20. 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.

21. Rajan K., et al. Remote agent: an autonomous control system for the new millennium // Proc. of prestigious applications of intelligent systems, European conference on artificial intelligence (ECAI), Berlin. 2000.
22. Innocenti B. A multi-agent architecture with distributed coordination for an autonomous robot. Ph.D. dissertation – Universitat de Girona, 2009.
23. Kim T.W., Yuh J. Development of a real-time control architecture for a semiautonomous underwater vehicle for intervention missions // Autonomous Systems Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Hawaii. 2003. P.1521-1530.
24. Sutarto H., Budiyo A. Development of linear parameter varying control system for autonomous underwater vehicle // Indian J. Geo-Marine Sci. 2011. V.40. P.275–286.
25. Sarhadi P., Noei A.R., Khosravi A. Model reference adaptive autopilot with anti-windup compensator for an autonomous underwater vehicle: Design and hardware in the loop implementation results // Appl. Ocean Res. 2017. V.62. P.27–36.
26. Geranmehr B., Nekoo S.R. Nonlinear suboptimal control of fully coupled non-affine six-DOF autonomous underwater vehicle using the state-dependent Riccati equation // Ocean Eng. 2015. V.96. P.248–257.
27. Fischer N., Hughes D., et al. Nonlinear RISE-Based Control of an Autonomous Underwater Vehicle // IEEE Trans. Robot. 2014. V.30. P.845–852.
28. Narasimhan M., Singh S.N. Adaptive optimal control of an autonomous underwater vehicle in the dive plane using dorsal fins // Ocean Eng. 2006. V.33. P.404–416.
29. Zhu D., Sun B. The bio-inspired model based hybrid sliding-mode tracking control for unmanned underwater vehicles // Eng. Appl. Artif. Intell. 2013. V.26. P.2260–2269.
30. Raeisy B., Safavi A.A., Khayatian A.R. Optimized fuzzy control design of an autonomous underwater vehicle // Iran. J. Fuzzy Syst. 2012. V.9. P.25–41.
31. Esfahani H.N., Azimirad V., Danesh M. A Time Delay Controller included terminal sliding mode and fuzzy gain tuning for Underwater Vehicle-Manipulator Systems // Ocean Eng. 2015. V.107. P.97–107.
32. Parhi D.R., Kundu S. Review on guidance, control and navigation of autonomous underwater mobile robot // Int. J. Artif. Intell. Comput. Res. 2012. V.4. P.21–31.
33. Dayan P., Berridge K.C. Model-based and model-free pavlovian reward learning: revaluation, revision and revelation // Cogn Affect Behav Neurosci. 2014. V.14. P.473–492.
34. El-Fakdi A., Carreras M. Two-step gradient-based reinforcement learning for underwater robotics behavior learning // Robotics and Autonomous Systems. 2013. V.61. No.3. P.271–282.
35. Zhang L., Jiang D., J. Zhao, Shan M. An AUV for ocean exploring and its motion control system architecture // Open Mechanical Engineering Journal. 2013. V.7. P.40-47.
36. Hasankashefi M., F. Bolouri F., Bolouri K. Path Planning and Open-Loop Control Algorithms for a Differential Thrust Autonomous Underwater Vehicle // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE) 2016. V.11, Issue 4. P.151-158.
37. Pinto J., Borges de Sousa J., Py F., Rajan K. Experiments with deliberative planning on autonomous underwater vehicles // IROS Workshop on Robotics for Environmental Monitoring, Vila Moura, Portugal. 2012.
38. Petillot Y.R., Antonelli G., Casalino G., Ferreira F. Underwater Robots: From Remotely Operated Vehicles to Intervention-Autonomous Underwater Vehicles // IEEE Robot. Autom. Mag. 2019. V.26. P.94–101.
39. Melo J., Matos A. Survey on advances on terrain based navigation for autonomous underwater vehicles // Ocean Eng. 2017. V.139. P.250–264.
40. Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В. Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. 1998. №2. С.64-116.
41. Ржевский Г.А., Скобелев П.О. Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. Самара: Офорт. 2015. 290 с.

V.S. Bykova, L.A. Martynova, A.I. Mashoshin, I.V. Pashkevich (State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)

### **Algorithms for Functioning of the Multiagent Control System of Autonomous Unhabitable Underwater Vehicle**

A version of the algorithms for the functioning of the autonomous unmanned underwater vehicle (AUV) control system developed by the authors is described. The algorithms are based on the multi-agent structure of the AUV control system. Their difference from the well-known algorithms lies in the principles underlying them and aimed at ensuring the universality of the algorithms, which allows them to be used in AUV control systems for various purposes.