

DOI 10.15589/jnn20160314  
 УДК 681.5: 629.584  
 Б69

## MODERN PROBLEMS OF GROUP MOTION CONTROL OF REMOTELY OPERATED UNDERWATER VEHICLES

## СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

**Volodymyr S. Blintsov**  
 volodymyr.blintsov@nuos.edu.ua  
 ORCID: 0000-0002-3912-2174

**Leo Tosin Aloba**  
 aloba.leo.tosin@nuos.edu.ua  
 ORCID: 0000-0002-0509-8129

**Doan Fuk Tkhy**  
 thuyhh2002@yahoo.com  
 ORCID: 0000-0002-3452-9039

**В. С. Блинцов,**  
 д-р. техн. наук, проф.

**Лео Тосин Алоба,**  
 асп.

**Доан Фук Тхы,**  
 инж.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

**Abstract.** A classification of methods for applying group autonomous underwater vehicle is offered. The classification covers the flat rectilinear and curvilinear motion of underwater vehicles, as well as their spatial motion group. The set of applied scientific and technical tasks for the development of systems of centralized and decentralized management of a group of underwater vehicles is formulated. It performs a common mission.

**Keywords:** autonomous underwater vehicle; group use; centralized movement; decentralized movement.

**Аннотация.** Предложена классификация методов группового применения автономных необитаемых подводных аппаратов. Сформулировано множество прикладных научно-технических задач по созданию систем централизованного и децентрализованного управления группой подводных аппаратов.

**Ключевые слова:** автономные необитаемые подводные аппараты; групповое применение; централизованное движение; децентрализованное движение.

**Анотація.** Запропоновано класифікацію методів групового застосування автономних незаселених підводних апаратів. Сформульовано безліч прикладних науково-технічних завдань зі створення систем централізованого та децентралізованого управління групою підводних апаратів.

**Ключові слова:** автономні незаселені підводні апарати; групове застосування; централізований рух; децентралізований рух..

## REFERENCES

- [1] Ageev M. D., Kiselev L. V., Matvienko Yu. V. *Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii* [Autonomous Underwater Robots: Systems and Technologies]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 398 p.
- [2] Babak L. N., Shcherbatyuk A. F. *Ob odnom algoritme poiska istochnika podvodnogo shleyfa, osnovannom na ispolzovanii gruppy ANPA* [About the algorithm for underwater plume source search, based on the use of the ROV group] *Upravlenie bolshimi sistemami. Spetsialnyy vypusk 30.1 «Setevye modeli v upravlenii»* [Large systems management. Special Edition 30.1 «Network models in management»]. Moscow, IPU RAN Publ., 2010, pp. 536–548.
- [3] Blintsov S. V. *Teoretychni osnovy avtomatychnoho keruvannya avtonomnykh pidvodnykh aparatamy* [The theoretical basis of automatic control of autonomous underwater vehicles]. Mykolaiv, NUK Publ., 2014. 242 p.
- [4] Veltishchev V. V., Yegorov S. A., Kropotov A. N. *Osobennosti razrabotki navigatsionnogo obespecheniya grup-pirovki avtonomnykh neobitaemykh apparatov* [Features of the development of navigational support for ROV group] *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and Applied hydrophysics], 2014, chapter 7, no. 2, pp. 41–45.

- [5] Ivanov D. Ya. *Ispolzovanie printsipov roevogo intellekta dlya upravleniya tselenapravlenym povedeniem massovo primenyaemykh mikrorobotov v ekstremalnykh usloviyakh* [Using the principles of swarm intelligence to control the behavior of targeted mass micro-robots used in extreme conditions] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy* [News of Higher Schools], 2011, no. 9, pp. 70–78.
- [6] Kalyaev I. A., Gayduk A. R., Kapustyan S. G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov* [Models and algorithms of collective management in groups of robots]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009. 280 p.
- [7] Miller P. *Roevoy intellekt: Muravi, pchely i ptitsy sposobny mnogomu nas nauchit* [Swarm Intelligence: Ants, bees, and birds can teach us a lot] *National Geographic Rossiya* [National Geographic Russia]. 2007, no. 8, pp. 88–107.
- [8] Edward Fiorelli, Naomi Ehrich Leonard, Pradeep Bhatta, Derek Paley. Multi-AUV Control and Adaptive Sampling in Monterey Bay. Proc. IEEE Autonomous Underwater Vehicles 2004: Workshop on Multiple AUV Operations (AUV04), June 2004. — Mode of access: <https://www.princeton.edu/~naomi/AUV13July04.pdf>.
- [9] Ferber, J. Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison Wesley Longman, 1999. — Mode of access: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/2/reviews/rouchier.html>.
- [10] HROV Nereus Expedition to the Mariana Trench. May 23 — June 6, 2009. — Mode of access: <http://www.whoi.edu/page.do?pid=32815&tid=282&cid=57366>.
- [11] Multi-Robot Systems, Trends and Development, Edited by Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura. Published by InTech, 2011. 586 p.
- [12] Nikolaos Tsiogkas. Efficient multi – AUV cooperation using semantic knowledge representation for underwater archaeology missions, 2014 Oceans, St. John's, pp. 1–6. Mode of access: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7003085&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D7003085](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7003085&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D7003085).
- [13] Oceanography and Mine Warfare. Ocean Studies Board. Commission on Geosciences, Environment, and Resources. National Research Council. National Academy Press, Washington, D. C., 2000. 112 p.
- [14] Robert W. Button, Kamp John, Curtin Thomas B., Dryden James. A Survey of Missions for Unmanned Undersea Vehicles. The RAND Corporation, 2009. 189 p.
- [15] Steven M. LaValle. PLANNING ALGORITHMS, 2006. 1007 p. — Mode of access: <http://planning.cs.uiuc.edu/book4.pdf>.
- [16] U.S. Navy. The Navy Unmanned Undersea Vehicle (UUV) Master Plan Paperback. December 9, 2014.
- [17] Zhongkui Li, Zhisheng Duan. Cooperative Control of Multi-Agent Systems. A CONSENSUS REGION APPROACH (Automation and Control Engineering), 2015. 250 p.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА, в англоязычной литературе — AUV, autonomous underwater vehicle) относятся к высокоэффективному виду необитаемой морской робототехники и широко используются для выполнения поисковых и обследовательских работ на всем диапазоне глубин Мирового океана [1, 10, 14]. Основные области их применения — океанография, охрана окружающей среды, геологоразведка, морская газо- и нефтедобывающая промышленность, противоминные операции и др. [13, 14, 16].

Увеличение объемов подводных работ и постоянное совершенствование технических характеристик АНПА стимулируют новое направление их применения — одновременное групповое использование на больших акваториях (в англоязычной литературе — multi-agent systems, MAS) Это обеспечивает наибольшую эффективность подводных работ, максимальную производительность поисковых операций

и максимальную достоверность получаемых данных о подводной среде из-за параллельного во времени измерения ее параметров.

Одним из главных вопросов по организации группового применения АНПА является оперативное управление несколькими аппаратами с целью их согласованного движения в водной среде для достижения общей цели (в англоязычной литературе — выполнение подводной миссии, Underwater Mission, UM). В современной зарубежной литературе имеются сведения о групповом применении АНПА, однако, эта информация носит рекламно-ознакомительный характер и не дает цельного представления о научной проблеме организации движения и оперативного управления для группы АНПА. Очевидно, на современном этапе развития подводной робототехники актуальной является прикладная научная задача классификации методов управления групповым движением АНПА с учетом их технических характеристик, особенностей подводной среды и свойств искомых

подводных объектов. Решение этой задачи позволит разработать теоретические основы синтеза нового вида систем автоматического управления (САУ) морскими подвижными объектами – системы группового управления (СГУ) АНПА.

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Вопросам группового применения АНПА посвящено значительное количество научных публикаций [2, 8, 9, 12]. Однако, единой системы классификации методов группового применения АНПА как основы для разработки соответствующих методов организации управления их групповым движением на сегодняшний день не существует. Вместе с тем, наблюдается устойчивое разделение стратегий управления группой роботов на централизованное и децентрализованное управление [11].

**ЦЕЛЮЮ СТАТЬИ** является разработка классификации методов группового применения АНПА в интересах изучения и освоения Мирового океана и связанных с ней методов группового управления (ГУ) АНПА как основы для разработки высокоэффективных систем автоматизации сложных подводных работ, которые выполняются на больших акваториях.

**ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

На основании изучения опыта успешного группового применения АНПА ведущими морскими государствами мира, а также, исходя из реальных задач подводного поиска в интересах украинских организаций предлагается следующая классификация подводных задач и методов их решения с помощью группы АНПА (табл. 1).

Первые четыре вида организации движения предусматривают синхронное или асинхронное перемещение группы из  $N$  АНПА по заданным прямолинейным траекториям. При этом линейные скорости АНПА могут быть строго одинаковыми ( $v_i = v_j$ ) или разными ( $v_i \neq v_j$ ).

Следующие четыре вида организации движения предусматривают движение АНПА по рассчитанным криволинейным траекториям, что накладывает дополнительные функции на их системы управления по текущему вычислению параметров движения  $i$ -го АНПА как агента мультиагентной поисковой подводной системы.

Приведенные первые восемь типовых видов группового движения реализуются с помощью принципов централизованного управления, когда параметры движения каждому аппарату как элементу группы выдает центральное управляющее устройство (например, пост группового управления на судне). В свою очередь, на такое устройство поступает информация о текущем состоянии всех АНПА и внешней окружающей среды.

Рассмотрим особенности организации централизованного управления группой АНПА.

*Движение фронтом* предусматривает линейное построение АНПА (пронумерованные окружности) с равными дистанциями  $h$  между ними в режиме поиска, рис. 1,а [4].

Величина  $h$  выбирается с учетом ширины  $s$  рабочей зоны поисковой аппаратуры АНПА, но не более радиуса действия бортовых систем связи аппаратов  $r_c$ :

$$h = \begin{cases} s & \text{при } r_c \geq s; \\ r_c & \text{при } r_c < s. \end{cases} \quad (1)$$

**Таблица 1.** Типовые подводные миссии и виды организации группового движения АНПА

Типовые движения	Типовые миссии*)	Поиск затонувших объектов	Картографирование донной поверхности	Мониторинг подводной среды	Обследование протяженных объектов	Научные исследования подводной среды	Военные применения
Централизованное управление							
1. Движение фронтом		+	+	+	+	+	+
2. Движение уступом		+		+		+	+
3. Движение клином		+		+		+	+
4. Радиальное движение (сходящееся и расходящееся)		+		+		+	+
5. Движение по кругу		+		+	+	+	+
6. Движение по концентрическим окружностям		+		+	+	+	+
7. Движение по спирали		+		+	+	+	+
8. Пространственное движение		-		+		+	+
Децентрализованное управление							
9. Роевое движение		+		+		+	+
10. Стайное движение		+		+		+	+
11. Коллективное движение		+		+		+	+

\* Преимущественное применение группового движения АНПА.

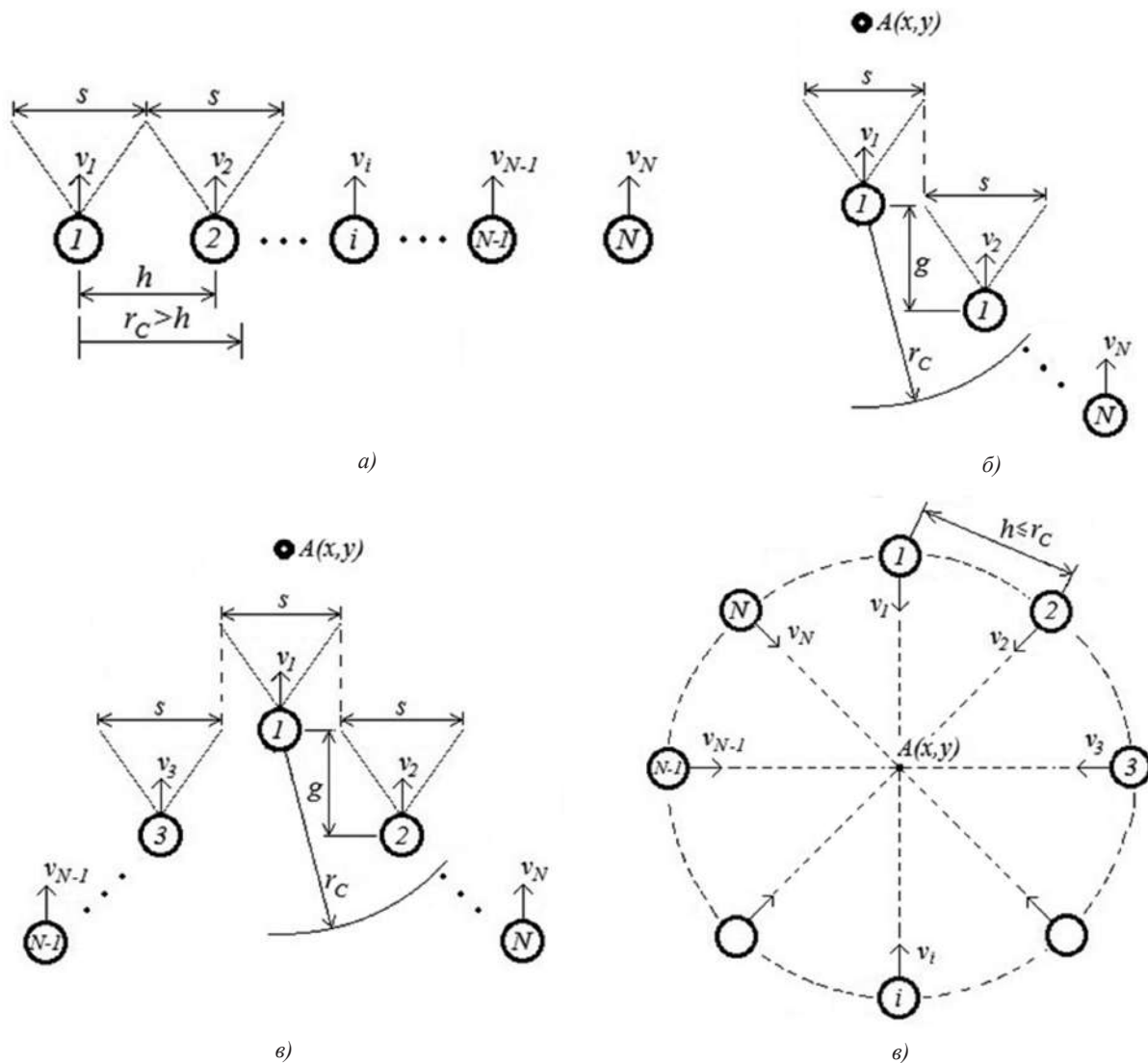


Рис. 1. Прямолинейные движения группы АНПА

Обычно дистанцию  $h$  выбирают с небольшим «перекрытием» ширины  $s$  рабочей зоны поисковой аппаратуры АНПА для гарантированного обследования донной поверхности без пропусков.

При обнаружении одним из аппаратов подводного объекта (цели поиска) его координаты передаются другим аппаратам, в результате чего группа АНПА перейдет в другой режим работы (например, перестроение с целью обследования или сопровождения объекта).

**Движение уступом** (рис. 1,б) применяют при поиске взрывоопасных предметов, когда их срабатывание на дистанции  $p$  может привести к повреждению соседних АНПА. Ступенчатое смещение АНПА  $g$  выбирается исходя из соображений безопасности, но не больше дальности  $r_c$  действия бортовых систем связи аппаратов:

$$g > \sqrt{p^2 - s^2/4} \text{ при } g < r_c. \quad (2)$$

**Движение клином** применяют, когда известно вероятное местонахождение объекта (цели поиска), рис. 1,в [4]. В этом случае групповое движение строится так, чтобы вершина клина была направлена на точку  $A(x, y)$  с вероятными координатами цели, а ступенчатое смещение АНПА  $g$  выбирается исходя из дальности действия бортовых систем связи аппаратов  $r_c$  или оперативного времени  $t_0$  подхода ближайшего АНПА к найденной цели:

$$g = \sqrt{r_c^2 - h^2}; \quad (3)$$

$$g = \sqrt{(vt_0)^2 - h^2}, \quad (4)$$

где  $v_i$  – линейная скорость движения  $i$ -го АНПА.

**Сходящееся радиальное движение** группы АНПА применяется в случае обнаружения одним из подводных аппаратов искомого объекта с координатами  $A(x, y)$  и принятии решения о его комплексном

обследовании или сопровождении. На рис. 1,б показан пример начального расположения группы АНПА, ранее двигавшейся по кругу. В общем случае исходное положение АНПА может быть произвольным, однако, векторы их скоростей после команды на сходящееся радиальное движение должны быть направлены на точку  $A(x, y)$ .

Расходящееся радиальное движение группы АНПА применяют:

- для поиска цели в рабочей круговой зоне с расположением судна-носителя группы АНПА в ее центре;
- как переходное движение для организации других видов движения.

**Групповое движение по кругу** предлагается авторами как промежуточная форма движения на стадии формирования группы АНПА с последующим ее перестроением для выполнения конкретной миссии (рис. 2,а). Главной задачей такого движения является удержание дистанции  $h$  между аппаратами не более  $r_c$ .

**Движение по концентрическим траекториям-окружностям** (рис. 2,б) предлагается при наличии в одной группе  $N$  аппаратов с различными техническими характеристиками, например, с разными скоростями движения, с разными показателями автономности и пр. В этих случаях закрепление конкретного АНПА за  $i$ -й окружностью осуществляется из расчета максимально полного обследования рабочей зоны с одновременным завершением миссии каждым аппаратом.

При этом дистанция  $h$  между АНПА, движущимися по соседних окружностям, должна быть не более радиуса действия бортовых систем связи аппаратов  $r_c$  (1).

Рассмотрим организацию управления движением группы их  $N$  аппаратов по концентрическим траек-

ториям на примере обследования круговой рабочей зоны донной поверхности площадью  $S_{UM}$ . Если известна ширина рабочей зоны  $s$  поискового оборудования АНПА, то количество подводных аппаратов в группе (при условии нахождения только одного АНПА на каждой круговой траектории) можно определить из отношения:

$$N = \frac{\sqrt{S_M/\pi}}{s}, \tag{5}$$

а радиус  $r_i$   $i$ -й круговой траектории для  $i$ -го АНПА можно определить из выражения:

$$r_i = \frac{s}{2} + (i-1)s. \tag{6}$$

Тогда, пронумеровав все АНПА в группе по возрастанию их скоростей хода  $v_i$ , определим общее время выполнения подводной миссии  $T_{UM}$  из выражения:

$$T_{UM} = \inf \left\{ T_i = \frac{2\pi r_i}{v_i} \right\}_{i=1, \dots, N}, \tag{7}$$

где  $\inf$  — оператор выбора меньшего члена множества  $\{T_1, \dots, T_N\}$ ;  $v_i$  — линейная скорость  $i$ -го АНПА.

**Движение группы АНПА по спирали Архимеда** (рис. 3) предлагается авторами для обследования рабочей зоны круговой формы с максимальной производительностью в условиях ограниченного количества АНПА в группе.

Для управления таким видом группового движения АНПА вначале необходимо построить спираль Архимеда в полярных координатах  $r = s\varphi$  с шагом не больше ширины рабочей полосы  $s$  поискового оборудования АНПА. Площадь построенной спирали  $S_A$

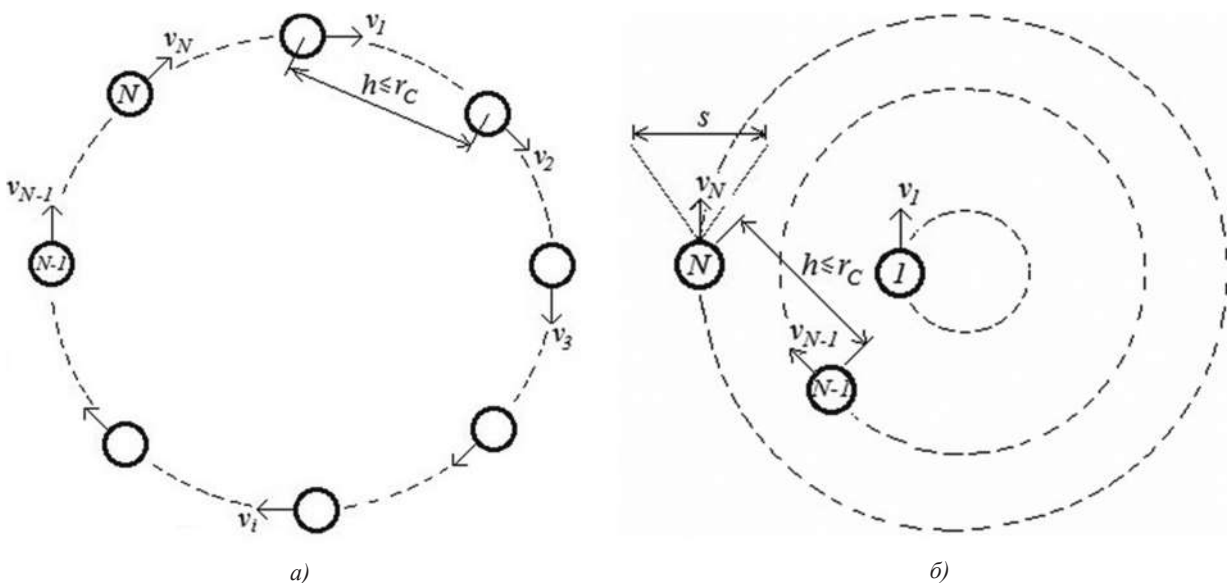


Рис. 2. Криволинейные движения группы АНПА

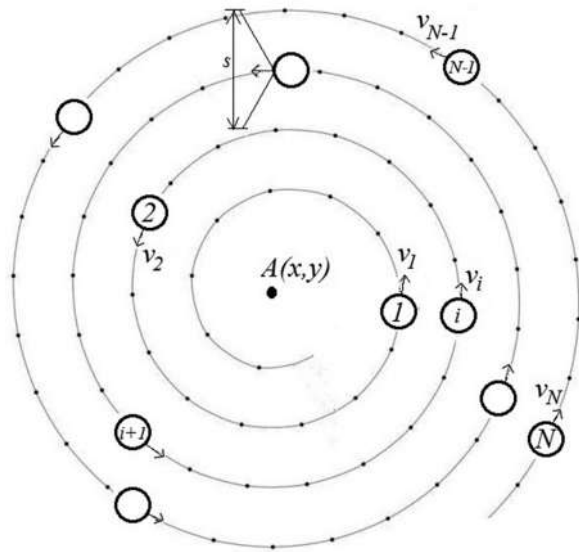


Рис. 3. Движение группы АНПА по общей спирали

должна быть равной площади  $S_{UM}$  рабочей зоны (круговой зоны поиска на донной поверхности), а центр спирали должен находиться в точке  $A(x; y)$  с вероятными координатами цели:

$$S_A = S_{UM} = \frac{1}{2} \int_0^{\varphi_M} r^2 d\varphi, \quad (8)$$

где  $r$ ;  $\varphi$  — соответственно, текущие значения радиус-вектора и полярного угла;  $\varphi_M$  — полярный угол спирали Архимеда площадью  $S_{UM}$ .

– находим число витков спирали Архимеда  $w_{UM}$  при заданной площади  $S_A \geq S_{UM}$ :

$$w_{UM} = \frac{R_{UM}}{s} = \sqrt{\frac{S_{UM}}{\pi s^2}}; \quad (9)$$

полагая, что  $s \ll R_{UM}$  и, следовательно, внешние витки спирали по форме близки к окружностям;

– находим полярный угол вычисленной спирали Архимеда:

$$\varphi = 2\pi w_{UM}; \quad (10)$$

– находим длину спирали Архимеда  $L_{UM}$  с шагом  $s$ , которая покрыла бы площадь круговой рабочей зоны  $S_A$ :

$$L_{UM} = 0,5s \left[ \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} + \ln \left( \varphi + \sqrt{1 + \varphi^2} \right) \right]; \quad (11)$$

где  $\varphi = 2\pi w$  — полярный угол вычисленной спирали Архимеда.

При заданном количестве  $N$  однотипных подводных аппаратов в миссии длина  $l_{АНПА}$  дистанции, которую должен пройти отдельный АНПА в группе, определяется отношением:

$$l_{АНПА} = L/N, \quad (12)$$

а при известной скорости хода АНПА  $v$  время  $T_M$  выполнения миссии находится из выражения:

$$T_{UM} = T_i = l_{АНПА}/v. \quad (13)$$

Зная длину  $l_{АНПА}$  дистанции для  $i$ -го АНПА группы, из (10) с учетом зависимости  $r = s\varphi$  можно вычислить полярные координаты  $\{r_i, \varphi_i\}$ , которые являются стартовыми для  $i$ -го АНПА группы.

Затем необходимо вывести каждый АНПА группы на исходную для него точку на спирали и осуществлять управление движением им как агентом группы по выделенному ему участку спирали так, чтобы обследование рабочей зоны в целом все АНПА закончили одновременно.

**Пространственное движение** группы АНПА, в отличие от рассмотренных выше видов плоского движения, является трехмерным и с позиций управления является наиболее сложным. Множество вариантов организации такого движения определяется множеством миссий по исследованию водной толщи. К типовым видам такого движения относятся: движение по треугольным наклонно-восходящим траекториям (рис. 4,а), характерное для подводных аппаратов-глайдеров [14]; движение по круговой спирали (рис. 4,б) [3] и другие.

Анализ приведенных основных видов организации группового движения АНПА и собственный опыт авторов в разработке и реализации систем автоматического управления (САУ) движением подводных аппаратов-роботов дает возможность сформулировать следующие основные задачи их централизованного управления: задача  $Z_{PM}$  планирования подводной миссии для группы АНПА в условиях ограничений на количество  $N$  подводных аппаратов в группе и на время  $T_{UM}$  выполнения подводной миссии; результатом решения указанной задачи должны быть обобщенная технологическая схема выполнения подводных работ, предложение по составу группы АНПА с заданными техническими характеристиками, а также обоснованные требования к точности управления АНПА; задача  $Z_{GC}$  синтеза системы автоматического управления групповым движением АНПА, отобранных для выполнения заданной подводной миссии, обеспечивающей согласованные перемещения подводных аппаратов по назначенным траекториям; результатом решения указанной задачи должны быть синтезированные законы и алгоритмы управления согласованным движением группы АНПА, обеспечивающие максимальную производительность группы, возможность оперативного перераспределения заданий между отдельными АНПА и высокую надежность сохранения полученной информации о подводной обстановке в районе проведения морских работ; задача  $Z_{AC}$  синтеза системы автоматического управления одиночным АНПА как элементом (агентом)

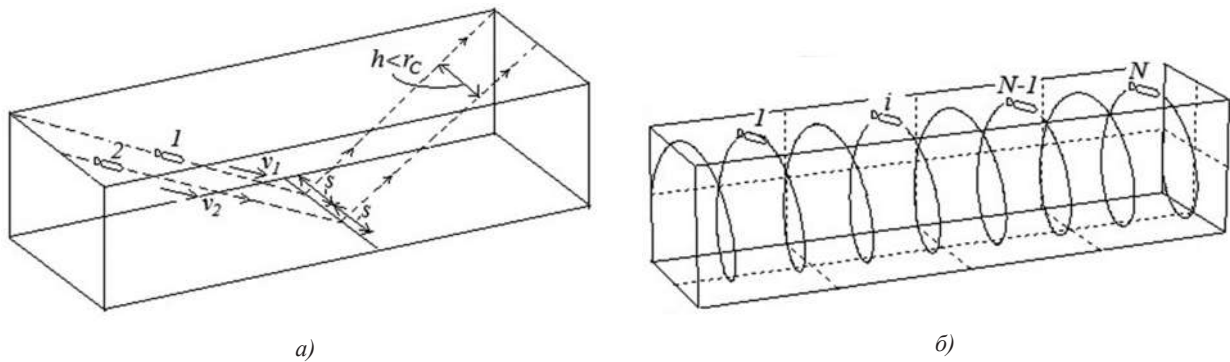


Рис. 4. Криволинейные движения группы АНПА

группы, результатом решения которой должны быть законы и алгоритмы автоматического управления траекторным движением АНПА в условиях нестационарности морской среды, неопределенности внешних возмущений и ограничений на энергетические и коммуникационные ресурсы.

Таким образом, современное состояние проблемы группового применения АНПА, как наиболее производительной формы проведения поисковых работ и получения оперативной подводной информации на больших акваториях, требует научно обоснованного решения комплексного задания  $Z_{MASz}$  автоматизации их централизованного группового движения и содержит три группы задач:

$$Z_{MASz} = \{Z_{PM}, Z_{GC}, Z_{AC}\}. \quad (14)$$

Основными направлениями исследований для решения указанных задач автоматизации группового движения АНПА при их централизованном управлении являются: синтез достоверных математических моделей динамики одиночного АНПА как объекта управления, функционирующего в условиях неопределенности; разработка методов математического моделирования управляемого группового движения АНПА с учетом условий подводной навигационной обстановки; применение элементов искусственного интеллекта (нечетких, нейросетевых и инверсных технологий) при синтезе законов управления движением АНПА.

Рассмотрим теперь особенности децентрализованного управления группой АНПА. Анализ научно-технической литературы показывает, что эта область робототехники занимается созданием когнитивных роботов (способных обучаться и делать ментальные выводы) и в настоящее время активно развивается [5, 6]. В настоящее время на основе анализа управления игровым микророботами можно выделить три основные стратегии в организации децентрализованного управления групповым движением АНПА: роевую, стайную и коллективную. В основе этих стратегий лежит принцип самоорганизации коллективного поведения децентрализованной системы

роботов на основе использования методов «роевого интеллекта» (в англоязычной литературе — Swarm intelligence) [17]. Системы роботов, функционирующие на основе роевого интеллекта, содержат большое количество достаточно простых и дешевых роботов-агентов (многоагентная система, в англоязычной литературе — Multiagent system), алгоритмы управления движением которых строятся с использованием теории искусственного интеллекта [15] с заимствованием законов функционирования биологических систем живой природы [7]: муравьиный алгоритм (Ant colony optimization); метод роя частиц (Particle swarm optimization); пчелиный алгоритм (Bees algorithm); оптимизация передвижением бактерий (Bacterial foraging optimization); стохастический диффузионный поиск (Stochastic diffusion search); алгоритм гравитационного поиска (Gravitational search algorithm); алгоритм капель воды (Intelligent Water Drops algorithm); светлячковый алгоритм (Firefly algorithm).

Основные различия между роевой, стайной и коллективной стратегиями группового управления заключаются в степени информированности членов группы (агентов, в нашем случае — АНПА) о миссии и о текущих характеристиках группы (количестве и задачах агентов, их скоростных и позиционных характеристиках и пр.).

Так, особенностью *роевой стратегии* децентрализованного управления группой АНПА является наличие коммуникаций столько с соседними агентами, по которым поступает информация об окружающей среде и характеристиках роботов-соседей. Каждый член группы при этом решает свою локальную задачу и принимает поведенческие решения на основании самостоятельно собранной информации об окружающей среде и информации, поступившей от соседей.

*Стайная стратегия* децентрализованного управления предполагает отсутствие связи с другими объектами. Каждый робот на основании самостоятельно собранной информации об окружающей среде самостоятельно принимает решение о своих последующих действиях для выполнения общей миссии группы. Отсутствие коммуникаций между роботами

группы позволяет успешно решать лишь такие задачи миссии, которые можно разбить на независимые и несвязные подзадачи. Главным достоинством стайных стратегий управления является масштабируемость: при увеличении численности группы роботов вычислительная сложность задач управления не возрастает, что позволяет применять стайные стратегии для управления очень большими группами агентов.

**Коллективная стратегия управления** подразумевает, что объекты, входящие в группу, имеют возможность обмениваться друг с другом информацией по принципу «каждый со всеми», знают о целях и задачах миссии, имеют сведения о составе коллектива и т.д. Поэтому каждый агент самостоятельно оценивает текущую ситуацию и самостоятельно принимает решение о дальнейшем функционировании. Коллективная стратегия управления позволяет группе сохранять работоспособность в случае выхода из строя одного или нескольких агентов группы.

Анализ приведенных основных стратегий движением группы АНПА позволяет сформулировать следующий перечень первоочередных научных задач, решение которых позволит организовать децентрализованное управление: задача  $Z_{i_i}$  самоидентификации  $i$ -го АНПА как члена группы подводных роботов, выполняющих общую миссию; задача  $Z_F$  построения системы коммуникаций между АНПА с характеристиками, соответствующими выбранной стратегии управления; задача  $Z_{Ni}$  навигационного обеспечения  $i$ -го АНПА условиях автономного плавания; задача  $Z_{Si}$  автоматического создания модели внешней среды и задача  $Z_{Ki}$  самообучения  $i$ -го АНПА для пространствен-

ного перемещения в условиях незнакомой внешней среды; задача  $Z_J$  планирования и организации поиска и идентификации цели (целей), их группового обследования, сопровождения или транспортирования.

Таким образом, в дополнение к множеству задач (13) организация децентрализованного управления группой АНПА содержит следующие группы задач:

$$Z_{MASd} = \{Z_{i_i}; Z_F; Z_{Ni}; Z_{Si}; Z_{Ki}; Z_J\}. \quad (14)$$

Одним из основных результатов решения указанного перечня задач должно быть создание теоретических основ создания когнитивной системы подводного робота, способного к эволюционному обучению, сохранению и передаче приобретенных знаний другим роботам, повышая их приспособляемость к изменяющимся характеристикам целей поиска и условиям функционирования.

**ВЫВОДЫ.** Предложена классификация методов группового применения автономных необитаемых подводных аппаратов в интересах изучения и освоения Мирового океана, которая охватывает плоское прямолинейное и криволинейное движение подводных аппаратов, а также их групповое пространственное движение. Сформулировано множество прикладных научно-технических задач по созданию систем централизованного и децентрализованного управления группой подводных аппаратов, выполняющих общую миссию. Полученные результаты могут служить теоретической основой для разработки высокоэффективных систем автоматизации группового движения подводных аппаратов при выполнении работ на больших акваториях.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Агеев, М. Д. Автономные подводные роботы: системы и технологии [Текст] / М. Д. Агеев, Л. В. Киселев, Ю. В. Матвиенко и др. — М. : Наука, 2005. — 398 с.
- [2] Бабак, Л. Н. Об одном алгоритме поиска источника подводного шлейфа, основанном на использовании группы АНПА [Текст] / Л. Н. Бабак, А. Ф. Щербатюк // Управление большими системами Специальный выпуск 30.1 «Сетевые модели в управлении». — М. : ИПУ РАН, 2010. — С. 536–548.
- [3] Блішцов, С. В. Теоретичні основи автоматичного керування автономними підводними апаратами [Текст]. — Миколаїв : Вид-во НУК, 2014. — 242 с.
- [4] Вельтищев, В. В. Особенности разработки навигационного обеспечения группировки автономных необитаемых аппаратов [Текст] / В. В. Вельтищев, С. А. Егоров, А. Н. Кропотов и др. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2014. — Том 7. — № 2. — С. 41–45.
- [5] Иванов, Д. Я. Использование принципов роевого интеллекта для управления целенаправленным поведением массово применяемых микророботов в экстремальных условиях [Текст] / Д. Я. Иванов // Известия высших учебных заведений, 2011. — № 9. — С. 70–78.
- [6] Каляев, И. А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов [Текст] / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 280 с.
- [7] Миллер, П. Роевой интеллект: Муравьи, пчелы и птицы способны многому нас научить [Текст] / П. Миллер // National Geographic Россия. — 2007. — № 8. — С. 88–107.
- [8] Edward Fiorelli, Naomi Ehrich Leonard, Pradeep Bhatta, Derek Paley. Multi-AUV Control and Adaptive Sampling in Monterey Bay. — Proc. IEEE Autonomous Underwater Vehicles 2004: Workshop on Multiple AUV Operations (AUV04), June 2004. — Mode of access: <https://www.princeton.edu/~naomi/AUV13July04.pdf>.
- [9] Ferber, J. Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison Wesley Longman, 1999. — Mode of access: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/2/reviews/rouchier.html>.



- [10] HROV Nereus Expedition to the Mariana Trench. May 23 — June 6, 2009. — Mode of access: <http://www.whoi.edu/page.do?pid=32815&tid=282&cid=57366>.
- [11] Multi-Robot Systems, Trends and Development, Edited by Toshiyuki Yasuda and Kazuhiro Ohkura. Published by InTech, 2011. — 586 p.
- [12] **Nikolaos Tsiogkas**. Efficient multi — AUV cooperation using semantic knowledge representation for underwater archaeology missions. — 2014 Oceans. — St. John's. — Pp. 1–6. Mode of access: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7003085&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D7003085](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7003085&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D7003085).
- [13] Oceanography and Mine Warfare. Ocean Studies Board. – Commission on Geosciences, Environment, and Resources. National Research Council. National Academy Press, Washington, D. C., 2000. — 112 p.
- [14] **Robert W. Button**. A Survey of Missions for Unmanned Undersea Vehicles [Text] / Button Robert W., Kamp John, Curtin Thomas B., Dryden James // The RAND Corporation, 2009. — 189 p.
- [15] **Steven M. LaValle**. PLANNING ALGORITHMS. — 2006. — 1007 p. — Mode of access: <http://planning.cs.uiuc.edu/book4.pdf>.
- [16] U.S. Navy. The Navy Unmanned Undersea Vehicle (UUV) Master Plan Paperback — December 9, 2014.
- [17] **Zhongkui Li**, Zhisheng Duan. Cooperative Control of Multi-Agent Systems — A CONSENSUS REGION APPROACH (Automation and Control Engineering), 2015. — 250 p.

---

© В. С. Блінцов, Лео Тосін. Алоба, Доан Фук Тхи  
Надійшла до редколегії 03.08.2016  
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. *К. В. Кошкін*