

13. *Muksunov T.R.* Programmno-apparatnye metody obrabotki signalov dlya povysheniya effektivnosti radioelektronnykh datchikov: avtoref. diss. [Software and hardware methods of signal processing for improving the efficiency of radio-electronic sensors: abstract of the dissertation]. Tomsk, 2015.
14. *Tarakanov E.V.* Eksperimental'nye issledovaniya protokola peredachi dannykh s prioritetaми v besprovodnoy sensornoy seti v sisteme Tossim [Experimental studies of the data transmission protocol with priorities in the wireless sensor network in the Tossim system], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Tomsk Polytechnic University], 2012, Vol. 321, No. 5.
15. *Programmirovaniye Arduino – dokumentatsiya* [Arduino programming-documentation]. Available at: <http://arduino.ru/Reference> (accessed 27 Desember 2020).
16. *Obrabotka dannykh s datchika v rezhime kvazireal'nogo vremeni – stat'ya* [Processing data from the sensor in the quasi-real-time mode-article]. Available at: <https://lhs-blog.info/programming/dlang/obrabotka-dannyih-s-datchika-v-rezhime-kvazirealnogo-vremeni/> (accessed 29 Desember 2020).
17. *Tsvetkov A.A.* Algoritmy effektivnogo kodirovaniya informatsionnykh istochnikov v sensornykh setyakh [Algorithms for efficient encoding of information sources in sensor networks].
18. *Erkin A.* Rasshirenie vozmozhnostey besprovodnykh setey ZigBee: izmerenie koordinat uzlov [Expanding the capabilities of ZigBee wireless networks: measuring the coordinates of nodes], *Besprovodnye tekhnologii* [Wireless technologies], 2011, No. 1.
19. *Safronov P.S.* Analiz kharakteristik protokola funktsionirovaniya besprovodnykh sensornykh setey LEACH: avtoref. diss. Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy universitet, 2017 [Analysis of the characteristics of the protocol for the functioning of wireless sensor networks LEACH: autoref. diss. South Ural State University, 2017].
20. *Kucheryavyu A.E.* Internet veshchey [Internet of Things], *Elektrosvyaz'* [Telecommunications], 2013, No. 1, pp. 21-24.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.А. Семенов.

Виноградов Геннадий Павлович – НИИ «Центрпрограммсистем»; e-mail: wgp272ng@mail.ru; г. Тверь, Россия; д.т.н.; зав. лабораторией.

Емцев Александр Сергеевич – e-mail: emcev@cps.tver.ru; инженер-программист.

Федотов Илья Сергеевич – e-mail: twlucifer@gmail.com; инженер-программист.

Vinogradov Gennady Pavlovich – Research Institute "Tsentrprogramsistem"; e-mail: wgp272ng@mail.ru; Tver, Russia, dr. of eng. sc.; head of the laboratory.

Emtsev Alexander Sergeevich – e-mail: emcev@cps.tver.ru; software engineer.

Fedotov Ilya Sergeevich – e-mail: twlucifer@gmail.com; software engineer.

УДК 007.52:62.503.51

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-30-47

А.М. Маевский, Р.О. Морозов, В.А. Рыжов, А.Е. Горелый

РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ АНПА В НЕИЗВЕСТНОЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Рассматривается проблема организации группового движения морских робототехнических комплексов (МРТК), в частности автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), в априори неизвестной среде с препятствиями. Выполнен краткий анализ существующих проектов по тематике группового управления МРТК, и алгоритмов планирования движения. Наличие многочисленных исследований по данному направлению подтверждает актуальность обозначенной проблемы. Приведена формальная постановка задачи движения четырех роботов строем. Предлагаемый в работе метод планирования

движения группы основан на комбинированном подходе, который организует многоуровневое решение к организации перемещения МРТК. На верхнем уровне разработана система глобального планирования и отработки миссии на основе метода случайных деревьев которая обеспечивает общее перемещение группы на основе априорной информации о состоянии среды. Система планирования нижнего уровня корректирует глобальную траекторию, позволяя объектам на локальном уровне осуществлять передвижение и взаимодействие агентов в группе, в том числе обеспечивает их безаварийное перемещение в пространстве и выход из областей локальных минимумов. В работе приводится подробное аналитическое описание разработанного алгоритма и блок-схема его функционирования. Проведено численное моделирование движения группы из 4 АНПА в недетерминированной среде с неподвижными препятствиями. Моделирование проводилось с учетом препятствий различной формы и сложности. Результаты математического моделирования продемонстрировали решение задачи выхода группы АНПА из области локального минимума. Приведены натурные испытания на примере группы из трёх безэкипажных катеров, в результате которых группа подвижных объектов сформировала строй и осуществила перемещение заданным строем в целевые позиции и вернулась в конечную зону. Кроме того, разработанный в рамках данной статьи модуль локального планирования был интегрирован в программное обеспечение системы планирования подводного глайдера «Тень». В конце рассматриваются полученные результаты работы предложенного метода и его дальнейшее развитие, в частности его применение в трехмерной постановке задачи.

АНПА; групповое управление; система управления; планирование пути; RRT метод; потенциальные поля.

A.M. Maevskiy, R.O. Morozov, V.A. Ryzhov, A.E. Gorelyi

**DEVELOPMENT OF A HYBRID METHOD FOR PLANNING THE
MOVEMENT OF A GROUP OF MARINE ROBOTIC COMPLEXES IN
AN A PRIORI UNKNOWN ENVIRONMENT WITH OBSTACLES**

The article discusses the problem of organizing the group movement of marine robotics (MRS), in particular, unmanned autonomous underwater vehicles (AUV), in an a priori unknown environment with obstacles. A brief analysis of existing projects on the subject of MRS group control, and path-planning algorithms have been carried out. The presence of numerous studies in this area confirms the relevance of the indicated problem. The formal statement of the problem of the movement of four robots in formation is presented. The proposed method for a group path planning is based on a combined approach that organizes a multi-level solution to organizing the movement of MRS. At the upper level, a system for global path planning and mission control was developed based on the random tree method, which provides the general movement of the group based on a priori information about the state of the environment. The lower-level planning system adjusts the global path, allowing objects at the local level to carry out the group agents' movement and interaction, including ensuring their collision-free movement in environment and exit from the areas of local minima. The article provides a detailed analytical description of the developed algorithm and a block diagram of its functioning. Numerical simulation of the movement of a group of 4 AUVs in a non-deterministic environment with fixed obstacles is carried out. The simulation was carried out taking into account obstacles of various shapes and complexity. The results of mathematical modeling demonstrated the solution to the problem of the exit of the AUV group from the area of the local minimum. Full-scale tests are presented on the example of a group of three unmanned boats: a group of mobile objects formed a formation and carried out a movement in a given formation to target positions and returned to the final zone. In addition, the local planning module developed within the framework of this article was integrated into the software of the "Shadow" underwater glider control system. In the conclusion, the results of the proposed method and its further development, in particular, its application in 3D environment, are considered.

AUV; group control; control system; path planning; RRT method; potential fields.

Введение. В настоящее время, актуальна проблема построения структур групп объектов и организация их перемещения в пространстве в различных средах. В частности, в настоящее время ведется большое количество разработок, свя-

занных с организацией группового взаимодействия беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и морских робототехнических комплексов [1–10]. Но несмотря на это, в связи со сложностью проблем, связанных с планированием движения групповых РТК сегодня не существует единого подхода дающего эффективного решения поставленных задач.

Сегодня для организации группового взаимодействия используются различные методы планирования траектории движения, разрабатываются методы интеллектуального планирования на основе нейронных технологий [11–13], другим направлением являются мультиагентные технологии [14], также распространены методы биоинспирированных подходов и методы на основе физических явлений, например, метод потенциальных полей и вытекающие из него [15–17].

Многие из перечисленных методов требуют предварительного процесса картографирования местности и могут осуществить полноценную работу исключительно по имеющейся карте, что существенно увеличивает время подготовительных работ для развертки МРТК и его вычислительные бортовые мощности [18]. Все это ведет к необходимости разработки таких методов планирования траектории движения групп МРТК, которые способны обеспечить функционирование группы в априори неизвестной среде с возможными препятствиями.

Рассматривая практическую сферу применения групп АНПА можно выделить несколько типовых задач:

- ◆ Мониторинг загрязнения заданного района акватории;
- ◆ Разведка углеводородов по их следам в водной толще акватории;
- ◆ Контроль биоресурсов и или картирование донных поверхностей;
- ◆ Патрулирование заданного района акватории, в том числе акустический контроль и наблюдение за движением в акватории биологических и не биологических объектов;
- ◆ Обзорно поисковые исследования. При крушении транспортных средств на территории акватории большой площади.

Пример решения задачи получения океанологических данных группой АНПА приводится в работе [19]. В данной работе использовалась распределенная система планирования, выдающая отдельные управляющие воздействия каждому АНПА с целью их выхода в определенную площадь акватории и проведения картографирования местности.

Взаимосвязанная работа группы из 2 АНПА типа Iver2 в целях наблюдения за акулами приводится в [20]. С помощью системы гидроакустической навигации аппарат вычисляет собственные координаты и ориентацию, и получает относительно них координаты расположения акул. Затем формируется общий массив входных данных подаваемый в систему управления, которая на основе этих данных формирует управляющее воздействие на исполнительные механизмы управления и движения АНПА.

В проекте [21] разработана система управления группой АНПА планерного типа. Не имея связи во время движения, аппараты уточняли свою позицию каждые 2 часа во время всплытия для сеанса связи. Система управления в данной работе генерирует набор путевых координат для каждого из аппаратов, что позволяет формировать глобальную миссию. Не зависимо от того что система планирования основана на градиентном методе, аппараты все равно привязаны к «виртуальному» лидеру группы, который координирует действия каждого из аппаратов. Лидером в группе выбирается тот АНПА который первым вышел на поверхность и определил свои координаты. После этого по времени восстановления связи с другими аппаратами он вносит уточнения в систему планирования каждого АНПА. В начале миссии оператор задает необходимый строй всем АНПА, после чего начинается процесс распределения позиций в формации.

В связи со сложностью проблем, связанных с планированием движения группы АНПА сегодня не существует единого подхода дающего эффективного решения поставленных задач. Целесообразна разработка многоуровневого метода планирования траектории движения группы АНПА.

Формальная постановка задачи. Сформируем целевую задачу для группы МРТК. Как правило, в работах, перечисленных выше применяется виртуальный лидер, который используется как центр группы. В рамках данной работы в качестве центра группы представлен волновой глайдер. Особенность его конструкции (наличие как подводной, так и надводной частей) позволяет использовать данный тип МРТК в качестве межсредного ретранслятора связи. В таком случае подводные глайдеры могут осуществлять взаимодействие с наземным пунктом управления через волновой глайдер.

Пусть в некотором пространстве глобальных координат R имеется N количество роботов с координатами

$$P_{AUV}(i) = [x(i)_{start}, y(i)_{start}]. \quad (1)$$

Массив точек P_{AUV} которые должны образовать определенного рода строй H , центром которой является волновой глайдер P_{USV} , в которой заданы координаты расположения формации $x(i)_{form}, y(i)_{form}$ и осуществить перемещение в заданную целевую точку P_{goal} с сохранением структуры строя. Под строем понимается пространственная структура аппаратов в группе. В целях согласованного взаимодействия элементам группы необходимо иметь информационный канал связи, однако его расстояние имеет физическое ограничение. В таком случае, необходимо построить такой тип строя, который не будет позволять аппаратам удаляться друг от друга больше чем на радиус r представляющий собой максимально-допустимое расстояние функционирования системы связи.

Проиллюстрированная задача изображена на рис. 1.

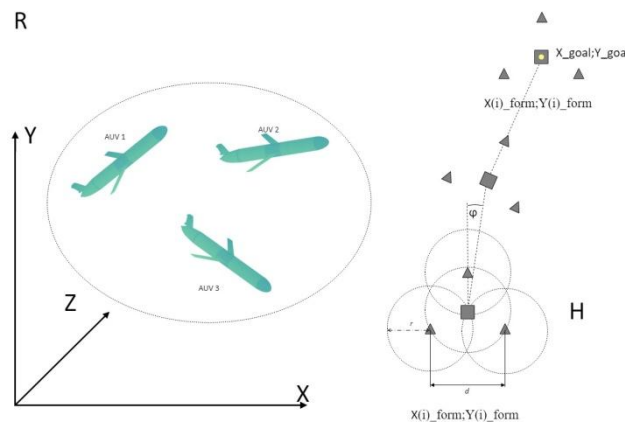


Рис. 1. Формальная постановка задачи

Для поставленной задачи необходимо решить ряд подзадач:

- ◆ задача оптимального построения формации, а именно минимизации времени $t \rightarrow \min$ построения строя и энергозатрат со стороны АНПА;
- ◆ задача оптимального перемещения строя в среде с сохранением его структуры, в том числе с возможностью реконфигурации строя;
- ◆ задача обнаружения и обхода возможных препятствии в режиме реального времени.

Разработка многоуровневого метода планирования пути группы МРТК.

Для решения поставленных задач был сформирован многоуровневый подход к организации структуры строя АНПА и их последующему перемещению в целевую позицию. Процесс работы предложенного двухуровневого алгоритма планирования можно проиллюстрировать с помощью схемы на рис. 2.



Рис. 2. Схема разрабатываемого алгоритма двухуровневого планирования

Как показано на схеме, предлагаемый алгоритм имеет несколько систем (уровней) планирования. На уровне глобального планирования в предполагаемой области пространства, формируется структура случайных ветвей RRT метода, в результате чего система выдает минимальное допустимое значение траектории движения из всех предложенных, после чего подается необходимое воздействие на исполнительные механизмы МРТК. Формирование строя группы и позиций в группе МРТК, происходит на основе метода потенциальных полей, аналогично данный метод отвечает и за удержание структуры формации и безаварийности движения каждого отдельного МРТК.

Рассмотрим процесс разработки каждого уровня системы планирования отдельно.

Разработка системы локального планирования группы АНПА. Для конфигурации строя и сохранения структуры строя во время движения каждый из АНПА ($AUV(i)$) рассчитывает свое положение на основе матрицы размерностью $n \times m$ где $m=n=9$, что является коэффициентом области функционирования. Расстояние между объектами в строе примем как $d = 1$, пример сконфигурированной формации изображен на рис. 3.

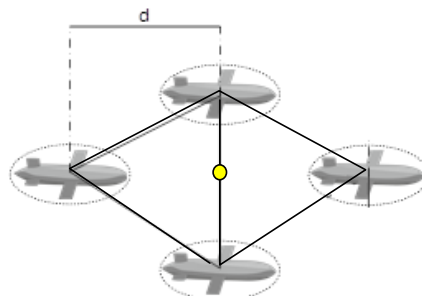


Рис. 3. Схема системы построения строя АНПА

На основании составленной матрицы формации можно получить двухмерный массив координат:

$$Coord_{form} = [x(i)_{form}, y(i)_{form}]. \quad (2)$$

На рисунке желтая точка O_{centr} – центр формации $O_{centr} = [x_{center}, y_{center}]$, рассчитанный как:

$$O_{centr} = \left[\frac{\sum_i^1 x_i}{i}, \frac{\sum_i^1 y_i}{i} \right], \quad (3)$$

где x_i, y_i – точки каждого из элементов формации.

Данная область строится относительно вектора стартовых координат $P_s = [x_{start}, y_{start}]$ заданных оператором в соответствии с выражением:

$$Coord_{form} = P_s + size(Am) * \frac{d}{2}. \quad (4)$$

Следует отметить, что формация также может быть сконфигурирована под определённым углом θ_{form} в качестве центра вращения выступает ранее рассчитанная точка O_{centr} .

Для вращения на заданный угол θ_{form} используется типичная матрица поворота M на плоскости XY относительно глобальной системы координат. После чего находятся точки формации на основании произведения матрицы M и матрицы начальных точек строя Am :

$$A_{form} = M * Am. \quad (5)$$

Полученные значения точек в A_{form} являются целевыми значениями координат для каждого АНПА. Для организации перемещения каждого $AUV(i)$ данное значение передается в систему планирования локальной траектории движения $AUV(i)$, на основе выражения:

$$F_{att} = \begin{cases} -0.4 * AUV - \frac{AUV}{d}, & D_{att} > \varepsilon \\ 0, & D_{att} < \varepsilon \end{cases}. \quad (6)$$

$$D_{att} = |AUV - P_f|. \quad (7)$$

Суть данного метода заключается в следующем. Движение объекта к цели осуществляется под действием притягивающей силы F_a , являющейся функцией координат АНПА и целевой точки. Точки препятствия, попавшие в зону действия сенсорной системы аппарата формируют отталкивающие виртуальные силы F_{ri} с равнодействующей F_r , являющейся функцией координат АНПА, его скорости и координат точек препятствий. Для каждого из АНПА сформирована притягивающая сила, зависящая от параметра $\varepsilon = 0.2$, который описывает радиус вхождения в окрестность целевой точки P_s и дистанции АНПА D_{att} до целевой точки P_f .

В свою очередь сила отталкивания, обеспечивающая безаварийное движение АНПА, формируется на основании данных об обнаруженных препятствиях и других элементов группы. Также следует отметить, что закон отталкивающей силы сформирован на основе экспоненциальной функции что увеличивает силу отталкивания при приближении АНПА к препятствию.

$$F_{rep_AUV} = \begin{cases} c * e^{(-\beta * D_{rep})} * \begin{bmatrix} \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{bmatrix}, & D_{rep_near_AUV} > \varepsilon \\ 0, & D_{rep_near_AUV} < \varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

$$D_{rep_near_AUV} = \sqrt{(x_{AUV} - x_{near_AUV})^2 + (y_{AUV} - y_{near_AUV})^2} \quad (9)$$

$$D_{rep_near_obs} = \sqrt{(x_{AUV} - x_{near_obs})^2 + (y_{AUV} - y_{near_obs})^2}, \quad (10)$$

где β, c – коэффициенты настройки силы отталкивания, D_{rep} – дистанция АНПА до препятствия (или других агентов группы АНПА), γ – угол направления между АНПА и обнаруженным препятствием рассчитанный как $\gamma = atan2(y_{AUV} - y_{near_obs}, x_{AUV} - x_{near_obs})$.

Аналогичным образом рассчитывается силы отталкивания АНПА от обнаруженных препятствий F_{rep_obs} с учетом дистанции до препятствия $D_{rep_near_obs}$. Таким образом общая составляющая силы отталкивания F_{rep} находится как сумма всех сил отталкивания действующих на АНПА в процессе его движения.

$$F_{rep} = \sum_{i=1}^{i+n} F_{rep_AUV(i)} + F_{rep_obs(n)}, \quad (11)$$

где $i+n$ – общее количество АНПА и препятствий, входящих в области ϵ для каждого АНПА.

Таким образом общая сила, действующая на каждый АНПА из группы может быть записана как сумма общих сил притяжения и отталкивания с учетом угла ориентации аппарата.

$$F_{total} = F_{att} + F_{rep}. \quad (12)$$

Исходя из полученных уравнений 11 и 12, можно составить уравнения для движения каждого агента группы АНПА:

$$\dot{x} = F_{total(1)} * \cos(\varphi) - F_{total(2)} * \sin(\varphi) \quad (13)$$

$$\dot{y} = F_{total(1)} * \sin(\varphi) + F_{total(2)} * \cos(\varphi) \quad (14)$$

$$\dot{\varphi} = atan2(F_{total(2)}, F_{total(1)}) \quad (15)$$

Движение группы в целом происходит за счет получения новой целевой точки центра группы $O_{goal} = [x_{group_goal}, y_{group_goal}]$ и общей силы, притягивающей формацию как это описывается в выражении:

$$F_{att_group} \begin{cases} k_{group} * O_{centr} - \frac{O_{goal}}{D}, D_{group} > \epsilon \\ 0, D_{group} < \epsilon \end{cases} \quad (16)$$

$$D_{group} = |O_{centr} - O_{goal}| \quad (17)$$

$$\theta_{group} = atan2(O_{centr}^{-1} - O_{goal}^{-1}) \quad (18)$$

Параллельно с этим, на основании выражений 13-15 происходит пересчет целевых точек в формации для каждого из АНПА, после чего полученные параметры новых значений $x_{aUV_target}; y_{aUV_target}; \theta_{aUV_target}$ передаются в систему управления АНПА. Процесс построения группы и движения группы в целевую точку [30;20] приводится на рис. 4.

Как известно, градиентные методы имеют существенную проблему, связанную с попаданием системы планирования в области локальных минимумов, в виду чего могут образовываться ситуации связанные с невозможностью продолжения движения отдельных аппаратов из группы или группы в целом, пример изображен на рис. 5.

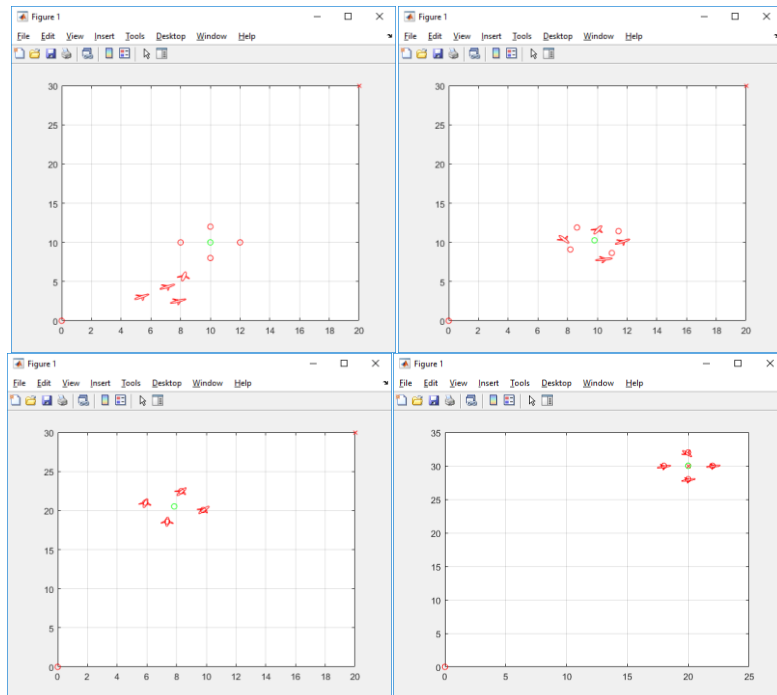


Рис. 4. Моделирование построения строя АНПА и его движение в целевую точку

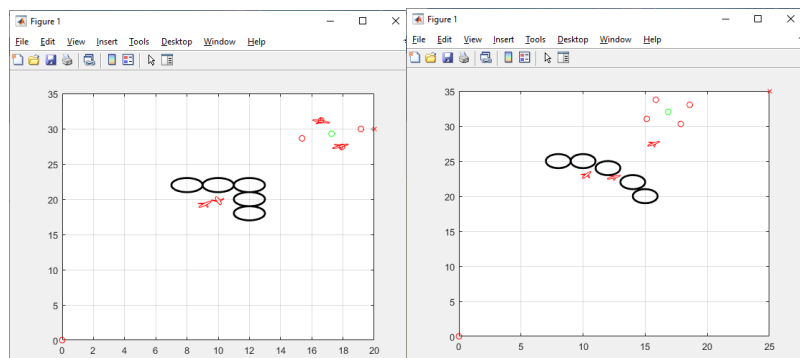


Рис. 5. Иллюстрирование проблемы локальных минимумов

Как видно из приведенных рисунков, подобная проблема в рамках функционирования группы АНПА может привести к потере структуры строя или повреждению одного, или нескольких аппаратов. В таком случае, является невозможным выполнение многих задач, поставленных перед группой.

Существует несколько способов решения данной проблемы [22], большинство из которых могут быть успешно применены к высокоманевренным аппаратам, в частности к БПЛА, но в виду конфигурации АНПА они обладают пониженной маневренностью и ходкостью по сравнению с воздушными аппаратами, такие методы сложно реализуемы в реальных условиях и требуют учёта в принимаемых архитектурно-конструкционных решениях непосредственно по АНПА.

Для оптимизации решения этой проблемы авторами предлагается введение более высокого уровня планирования глобальной траектории.

Разработка системы глобального планирования. Исходя из постановки задачи, основная цель группы АНПА переместиться из начальной точки пространства R в конечную точку. Система глобального планирования основана на модификации алгоритма RRT^x , рассмотренный в работе [23]. В результате применения этого метода строится карта ветвей случайного дерева, которая охватывает всю исследуемую область. Данный процесс не занимает много времени и может быть произведен во время предпусковых работ. Блок-схема работы алгоритма планирования верхнего уровня представлена на рис. 6.

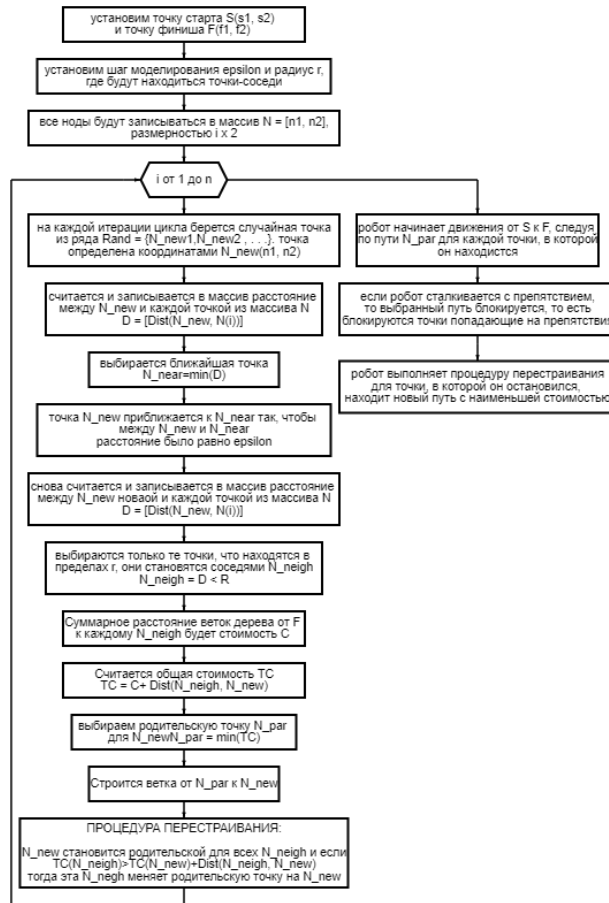


Рис. 6. Схема системы планирования верхнего уровня

В качестве входных параметров для работы алгоритма используются: R – размер области функционирования; P_s – точка старта группы; P_f – точка финиша группы; ϵ – шаг моделирования; r – радиус в пределах области пространства G в которой будет производиться поиск соседних узлов дерева.

Сформируем множество случайных точек:

$$A_{rand} = \{N_{rand\ i1}, N_{rand\ i2}, \dots, N_{rand\ in}\}, i = 1..n, \quad (19)$$

где n – количество итераций цикла (плотность построенных точек в пространстве функционирования группы R), $N_{rand\ i1}$ – случайная точка с координатами $[x_{rand}, y_{rand}]$.

Множество точек всего дерева, построенных во время работы, обозначим как

$$T_{tree} = \{T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{in}\}, i = 1..n, \quad (20)$$

где $T_{i1} = [x_{Ti}, y_{Ti}]$ – i точка из массива T_{tree} .

Вычислим массив дистанций D от каждой точки $N_{rand\ i1} \in A_{rand}$ до каждой точки $T_{i1} \in T_{tree}$

$$D = |N_{rand\ i1} - T_{i1}| \quad (21)$$

$$Dist = [D, id],$$

где id – номер соответствующей точки.

Из полученных значений $Dist$ находится минимальное и присваивается соответствующий id для ближайшей точки N_{near}

$$N_{near\ i} = \min(Dist). \quad (22)$$

В результате получаем координаты $N_{near} = [x_{near}, y_{near}]$ и вычисляется перемещение точки N_{rand} на величину eps к точке N_{near} с учетом следующего условия

$$T_{i1} = N_{near\ i} + (-1) * e * \frac{N_{near\ i} - N_{rand\ i1}}{Dist}. \quad (23)$$

Полученные координаты точки $T(i)$ также являются новой точкой для расширения ветвей дерева $T_{i1} = N_{new}$.

Для точки N_{new} рассчитаем дистанцию до всех остальных точек из массива T_{tree}

$$D^* = |N_{new} - T_{i1}| \quad (24)$$

Для построения минимальной траектории пути в регионе рассчитанной точки N_{new} введем круглую область пространства G радиусом r с центром в точке N_{new} . Выберем массив точек N_{neigh} , которые удовлетворяют условию

$$N_{neigh} = T_{tree\ i}, T_{tree\ i} \in G. \quad (25)$$

Получив массив точек N_{neigh} определим общую стоимость перехода K_{total} между точками из массива N_{neigh} до точки финиша P_f как

$$K_{total} = K + D^* \quad (26)$$

где K – количество переходов до точки N_{near} .

Полученный результат позволяет сформировать массив точек N_{par} , которые описывают вершины веток деревьев используемых в построении траектории в целом, на основе выбора минимальных значений из K_{total}

$$N_{par} = \min(K_{total}). \quad (27)$$

После чего строится новая ветвь дерева T_{tree} от точки N_{new} к точке N_{par} .

На заключительной стадии алгоритма происходит процесс перестроения дерева, с целью оптимизации построенной траектории. Для этого рассчитаем значение стоимости перехода $K_{total\ neigh}$ по отношению к каждой точке массива N_{neigh} с условием того, что данный массив будет заканчиваться в точке N_{new} .

$$K_{total\ neigh} = K_{total\ new} + D^*. \quad (28)$$

Сравним затраченную стоимость перехода если $K > K_{total\ neigh}$ то строим соответствующую ветвь дерева и удаляем предыдущую, если $K < K_{total\ neigh}$ то оставляем все без изменений.

Заканчивая процесс перестроения ветвей дерева, с учетом прохождения всех итераций алгоритма, группа АНПА начинает перемещение по полученной траектории.

В случае возникновения препятствий алгоритм повторяет процедуру перестроения для точки, в которой он обнаружил препятствие, таким образом находясь самый оптимальный путь в рамках построенного дерева.

Схематичный процесс основных этапов выполнения алгоритма и процесса перестроения ветвей дерева в случае обнаружения глобального препятствия представлен на рис. 7 и 8.

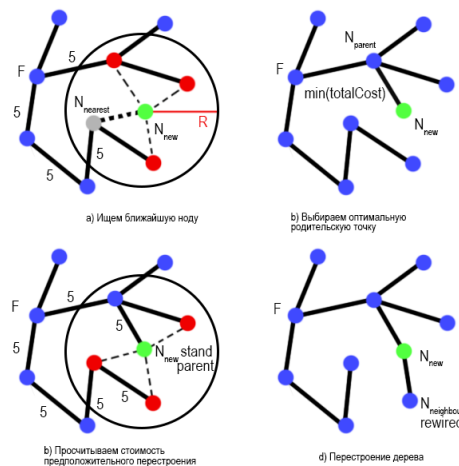


Рис. 7. Визуализация процесса перестроения ветвей

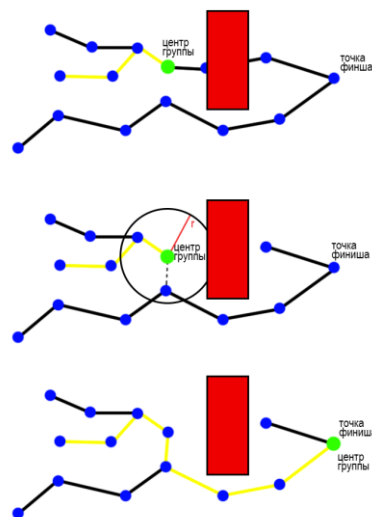


Рис. 8. Визуализация процесса перестроения ветвей в случае обнаружения препятствия

Рассмотрим процесс моделирования движения группы АНПА (в данном случае под структурой группы рассматривается область, выделенная красным пунктирным кругом, которая также является радиусом восприятия системы технического зрения на основе активной гидролокации), изображенный на рис. 9.

С начала алгоритм заполняет область пространства R ветвями дерева на данном этапе система планирования ничего не знает об окружающей среде.

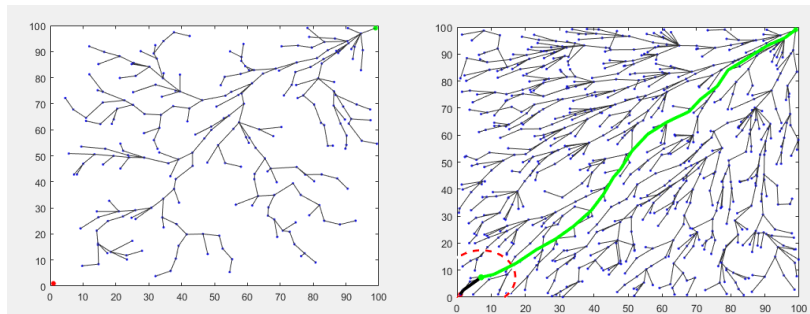
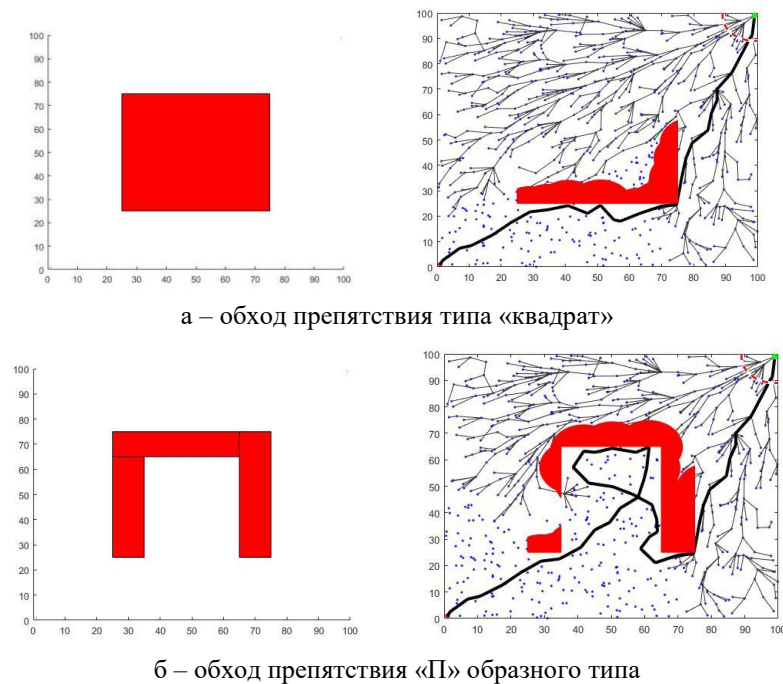
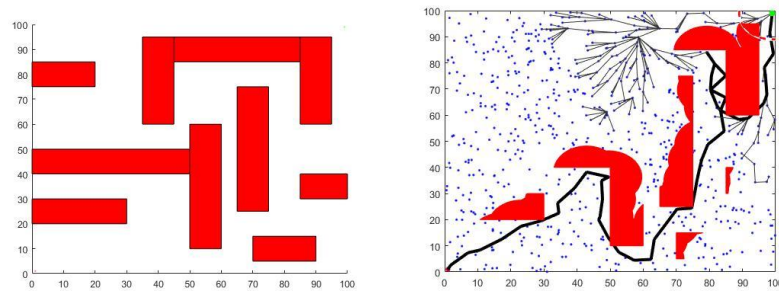


Рис. 9. Первый этап моделирования. Процесс построения ветвей дерева и начало движения по выбранной траектории

На следующем этапе работы алгоритма осуществляется перемещение группы АНПА по выбранной траектории. Конфигурация формы препятствий была выбрана таким образом, чтобы исследовать работоспособность разработанного алгоритма, как при условии препятствий легкой структуры, так и в условиях препятствий сложной формы, в которых система локального планирования попадала бы в условия локального минимума.

Формы препятствий и траектории движения группы АНПА, с учетом их обхода представлены на рис. 10.





в – выход группы в целевую точку из области сложной конфигурации

Рис. 10. Пример работоспособности алгоритма в условиях неизвестной среды в режиме реального времени с препятствиями различной сложности

Разработанная система локального планирования была успешно апробирована в ходе испытаний, проведенных в октябре 2020 года. Модуль локального планирования был интегрирован в программное обеспечение системы планирования подводного глайдера «Тень». Пример планирования миссии представлен на рис. 11.

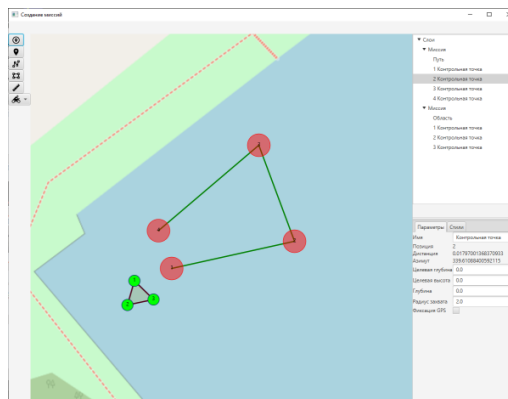


Рис. 11. Создание миссии

На рис. 11 зелеными точками обозначены координаты элементов группы. Красными точками выделены целевые позиции, в которые должна была прийти группа с учетом сохранения сконфигурированного строя. В виду погрешности системы GPS радиус входа в целевую точку задан как 2 м. В качестве объектов группы были выбраны безэкипажные катера (БЭК). Изображенные на рис. 12.



Рис. 12. Группа БЭК

Результаты движения группы БЭК представлены на рис. 13. Общая длина пройденной дистанции 62 м, время прохождения 60 сек, средняя скорость 1 м/с.

Как видно из приведенных иллюстраций и алгоритм продемонстрировал устойчивую работу во время движения группы БЭК. Группа прошла все целевые точки с сохранением структуры заданного строя. Траектория движения как это отображено на рис. 13 более сглаженная в виду особенностей разрабатываемого алгоритма.

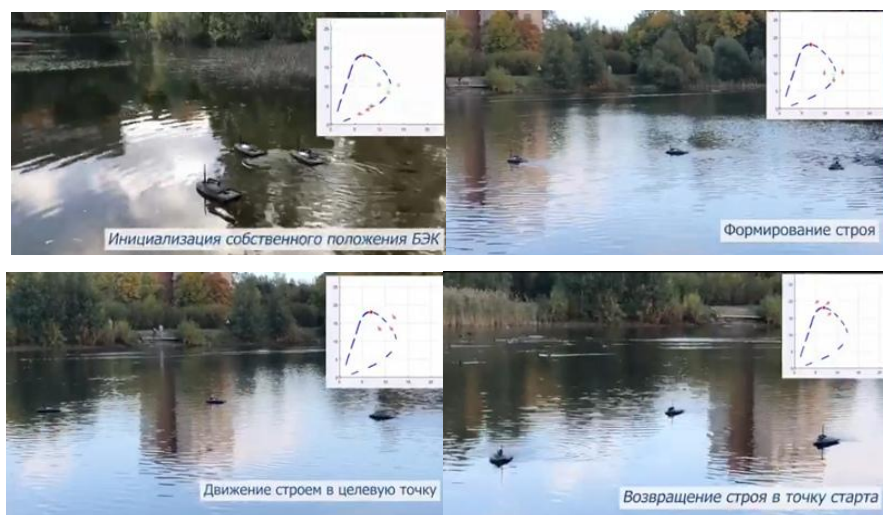


Рис. 13. Натурные испытания движения группы БЭК

Заключение. В работе рассмотрен процесс разработки многоуровневого принципа планирования движения группы АНПА в среде с препятствиями.

Система глобального планирования МРТК осуществляет построение целевой траектории движения группы путем заполнения общей карты пространства расчетными ветвями деревьев, что позволяет планировщику осуществлять перестроения траектории движения группы АНПА в режиме реального времени на основе данных получаемых от системы технического зрения на базе активной гидролокации АНПА. Система планирования нижнего уровня отвечает за формирование и поддержание строя АНПА во время движения и за возможный обход локальных препятствий единичными АНПА.

В совокупности разработанный метод планирования применим в режиме реального времени, также он позволяет организовать перемещение группы МРТК в условиях сложных сред с препятствиями и обеспечить сохранение структуры строя и ее мобильное перестроение в случае необходимости.

В рамках дальнейших работ предполагается доработка сопряженного процесса работы двух систем планирования, предложенных в данной статье, оптимизации алгоритма по критериям скорости работы планирования, оптимальности построения маршрутов (сглаживание полученных траекторий, для того чтобы САУ АНПА могла их отработать) и вычислительных затрат. Также планируется исследование работоспособности предложенного метода планирования в трехмерной среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Занин В.Ю., Кожемякин И.В., Маевский А.М. Использование морской робототехники в задачах оперативной океанографии. Отечественный и зарубежный опыт // Морские информационно-управляющие системы. – 2020. – № 1 (17). – С. 39-49.
2. Маевский А.М., Копылов С.А. Аспекты использования группировки подводных глайдеров для экологического мониторинга мирового океана // Матер. всероссийской конференции и школы молодых ученых «Системы обеспечения техносферной безопасности». – Таганрог: ЮФУ, 2014. – С. 11-12.
3. Волошин С.Б., Занин В.Ю., Маевский А.М. и др. Аспекты применения гетерогенных групп робототехнических комплексов повышенной автономности, в том числе из состава обсерваторий, с целью получения океанографических данных и их дальнейшего использования для освоения Арктической зоны // Сб. работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2020 года. – М.: Министерство энергетики Российской Федерации, ООО «Технодевелоп», 2020. – С. 62-77.
4. Гайкович Б.А. Разработка модульноунифицированного семейства подводных глайдеров. Новый оборонный заказ. 2017, 05.
5. Гайкович Б.А. Подводные глайдеры-роботы для исследования и мониторинга арктических акваторий // Корабел.ру. – 2015. – № 4 (30). – С. 126-12.
6. Гайкович Б.А., Занин В.Ю. Вопросы создания семейства морских глайдеров как элементов глобальной системы морской безопасности // Матер. 9 научнопрактической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2014. – С. 211-218.
7. Devitt D., Morozov R., Medvedev M., Shapovalov I., Kononov G. Implementation of the hybrid technology for quadcopter motion control in a complex non-deterministic environment // International Conference on Control, Automation and Systems. – 2018. – Vol. 18. – P. 451-456.
8. Beloglazov D., Pereverzev V., Soloviev V., Pshikhov V., Morozov R. Method of formation of quantitative indicators of complexity of the environment by a group of autonomous mobile robots // Journal of Robotics. – 2020. – Vol. 2020. – P. 6874291.
9. 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. – Doi: 10.31799/1684-8853-2020-4-31-41.
10. Киселев Н.К., Мартынова Л.А., Пашкевич И.В. Математическая модель функционирования гибридной системы энергообеспечения в составе стенда отладки и сопровождения АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 170-187.
11. Gaiduk A.R., Martjanov O.V., Medvedev M.Yu., Pshikhov V.Kh., Hamdan N., Farhood A. Neural network based control system for robots group operating in 2-d uncertain environment // Mechatronics, Automation, Control. – 2020. – Vol. 21, No. 8. – P. 470-479.
12. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Пархоменко В.Б., Васильева М.А. Исследование интеллектуальной системы управления автономного наземного робота с нейронной сетью глубокого обучения // Информационные технологии в управлении (ИТУ-2018): Матер. конференции. – 2018. – С. 176-182.
13. Джунусов И.А., Фрадков А.Л. Синхронизация в сетях линейных агентов с обратными связями по выходам // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 8. – С. 41-52.
14. Тимофеев А.В. Адаптивное управление и интеллектуальный анализ информационных потоков в компьютерных сетях. – М.: Анатолия, 2012. – 280 с.
15. Платонов А.К., Кирильченко А.А., Колганов М.А. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2001. – 32 с.
16. Богуславский А.А., Боровин Г.К., Карташев В.А., Павловский В.Е., Соколов С.М. Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2019. – 228 с. – <https://doi.org/10.20948/mono-2019-boguslav>.
17. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // Тр. СПИИРАН. – 2018. – № 5 (60). – С. 39-63.

18. *Маевский А.М., Гайкович Б. А.* Разработка легкого интервенционного ав-тономного обитаемого подводного аппарата в целях использования в подводных резидентных системах // Матер. XIV Всероссийской научно-практической конференции и X молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во: ЮФУ, 2019. – С. 83-98.
19. *Schultz B. & Hobson B. & Kemp, Mathieu & Meyer J. & Moody R. & Pinnix H. & Clair M.* Multi-UUV missions using RANGER MicroUUVs. – 2003.
20. *Shinzaki, Dylan & Gage, Chris & Tang, Sarah & Moline, Mark & Wolfe, Barrett & Lowe, Christopher & Clark, Christopher.* A multi-AUV system for cooperative tracking and following of leopard sharks // Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2013. – P. 4153-4158. – Doi: 10.1109/ICRA.2013.6631163.
21. *Leonard N.E., Paley D.A., Davis R.E., Fratantoni D.M., Lekien F. and Zhang F.* Coordinated control of an underwater glider fleet in an adaptive ocean sampling field experiment in Monterey Bay // J. Field Robotics. – 2010. – Vol. 27. – P. 718-740. – Doi: 10.1002/rob.20366.
22. *Белоглазов Д.А., Гайдук А.Р., Косенко Е.Ю., Медведев М.Ю., Пилюхов В.Х., Соловьев В.В., Титов А.Е., Финаев В.И., Шаповалов И.О.* Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / под ред. В.Х. Пилюхова. – М.: Физматлит, 2015. – 305 с.
23. *RRTX: Asymptotically Optimal Single-Query Sampling-Based Motion Planning with Quick Replanning.* Michael Otte and Emilio Frazzoli // The International Journal of Robotics Research. – 2016. – Vol. 29, Issue 7. – P. 797-822.

REFERENCES

1. *Zanin V.Yu., Kozhemyakin I.V., Maevskiy A.M.* Ispol'zovanie morskoy robototekhniki v zadachakh operativnoy okeanografii. Otechestvennyy i zarubezhnyy opyt [The use of marine robotics in operational oceanography tasks. Domestic and foreign experience], *Morskie informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Marine information and control systems], 2020, No. 1 (17), pp. 39-49.
2. *Maevskiy A.M., Kopylov S.A.* Aspekty ispol'zovaniya gruppirovki podvodnykh glayderov dlya ekologicheskogo monitoringa mirovogo okeana [Aspects of using the grouping of underwater gliders for environmental monitoring of the world ocean], *Mater. vserossiyskoy konferentsii i shkoly molodykh uchenykh «Sistemy obespecheniya tekhnosfernoy bezopasnosti»* [Materials of the All-Russian conference and school of young scientists "Systems for ensuring Technosphere security"]. Taganrog: YuFU, 2014, pp. 11-12.
3. *Voloshin S.B., Zanin V.Yu. Maevskiy A.M. i dr.* Aspekty primeneniya geterogennykh grupp robototekhnicheskikh kompleksov povyshennoy avtonomnosti, v tom chisle iz sostava observatoriy, s tsel'yu polucheniya okeanograficheskikh dannykh i ikh dal'neyshego ispol'zovaniya dlya osvoeniya Arkticheskoy zony [Aspects of the application of heterogeneous groups of robotic complexes of increased autonomy, including from the composition of observatories, for the purpose of obtaining oceanographic data and their further use for the development of the Arctic zone], *Sb. rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitie i osvoenie Arktiki i kontinental'nogo shel'fa 2020 goda* [Collection of works of laureates of the International Competition of Scientific, Scientific-technical and Innovative Developments aimed at the development and development of the Arctic and Continental Shelf in 2020]. Moscow: Ministerstvo energetiki Rossiyskoy Federatsii, OOO «Tekhnodevelop», 2020, pp. 62-77.
4. *Gaykovich B.A.* Razrabotka modul'nounifitsirovannogo semeystva podvodnykh glayderov. Novyy oboronnyy zakaz. 2017, 05 [Development of a modularunified family of underwater gliders. A new defense order. 2017, 05].
5. *Gaykovich B.A.* Podvodnye glaydery-roboty dlya issledovaniya i monitoringa arkticheskikh akvatoriy [Underwater gliders-robots for research and monitoring of Arctic waters], *Korabel.ru* [Korabel.ru], 2015, No. 4 (30), pp. 126-12.
6. *Gaykovich B.A., Zanin V.Yu.* Voprosy sozdaniya semeystva morskikh glayderov kak elementov global'noy sistemy morskoy bezopasnosti [Issues of creating a family of marine gliders as elements of the global maritime security system], *Mater. 9 nauchnoprakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Materials of the 9th scientific and practical conference "Perspective systems and management tasks"], 2014, pp. 211-218.

7. Devitt D., Morozov R., Medvedev M., Shapovalov I., Konovalov G. Implementation of the hybrid technology for quadcopter motion control in a complex non-deterministic environment, *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2018, Vol. 18, pp. 451-456.
8. Beloglazov D., Pereverzev V., Soloviev V., Pshikhopov V., Morozov R. Method of formation of quantitative indicators of complexity of the environment by a group of autonomous mobile robots, *Journal of Robotics*, 2020, Vol. 2020, pp. 6874291.
9. Martynova L.A., Kiselev N.K., Myslivyy A.A. Metod vybora arkhitektury mul'tiagentnoy sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Method of selecting the architecture of a multi-agent control system of an autonomous uninhabited underwater vehicle], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2020, No. 4, pp. 31-41. Doi: 10.31799/1684-8853-2020-4-31-41.
10. Kiselev N.K., Martynova L.A., Pashkevich I.V. Matematicheskaya model' funktsionirovaniya gibridnoy sistemy energoobespecheniya v sostave stenda otladki i soprovozhdeniya ANPA [Mathematical model of the functioning of a hybrid power supply system as part of the ANPA debugging and maintenance stan], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 1, pp. 170- 187.
11. Gaiduk A.R., Martjanov O.V., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Hamdan N., Farhood A. Neural network based control system for robots group operating in 2-d uncertain environment, *Mechatronics, Automation, Control*, 2020, Vol. 21, No. 8, pp. 470-479.
12. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Parkhomenko V.B., Vasil'eva M.A. Issledovanie intellektual'noy sistemy upravleniya avtonomnogo nazemnogo robota s neyronnoy set'yu glubokogo obucheniya [Research of the intelligent control system of an autonomous ground robot with a neural network of deep learning], *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii (ITU-2018): Mater. konferentsii* [Information technologies in management (ITU-2018): Materials of the conference], 2018, pp. 176-182.
13. Dzhunusov I.A., Fradkov A.L. Sinkhronizatsiya v setyakh lineynykh agentov s obratnymi svyazami po vykhodam [Synchronization in networks of linear agents with feedback on outputs], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2011, No. 8, pp. 41-52.
14. Timofeev A.V. Adaptivnoe upravlenie i intellektual'nyy analiz informatsionnykh potokov v komp'yuternykh setyakh [Adaptive management and intelligent analysis of information flows in computer networks]. Moscow: Anatoliya, 2012, 280 p.
15. Platonov A.K., Kiril'chenko A.A., Kolganov M.A. Metod potentsialov v zadache vybora puti: istoriya i perspektivy [The method of potentials in the problem of choosing a path: history and prospects]. Moscow: IPM im. M.V. Keldysha, 2001, 32 p.
16. Boguslavskiy A.A., Borovin G.K., Kartashev V.A., Pavlovskiy V.E., Sokolov S.M. Modeli i algoritmy dlya intellektual'nykh sistem upravleniya [Models and algorithms for intelligent control systems]. Moscow: IPM im. M.V. Keldysha, 2019, 228 p. Available at: <https://doi.org/10.20948/mono-2019-boguslav>.
17. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Gruppovoe upravlenie dvizheniem mobil'nykh robotov v neopredelennoy srede s ispol'zovaniem neustoychivyykh rezhimov [Group control of the movement of mobile robots in an uncertain environment using unstable modes], *Tr. SPIIRAN* [Works of SPIIRAS], 2018, No. 5 (60), pp. 39-63.
18. Maevskiy A.M., Gaykovich B.A. Razrabotka legkogo interventsionnogo avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata v tselyakh ispol'zovaniya v podvodnykh rezidentnykh sistemakh [Development of a light interventional autonomous uninhabited underwater vehicle for use in underwater resident systems], *Mater. XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i X molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Materials of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference and the X Youth School-seminar "Information Management and Processing in Technical systems"]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo: YuFU, 2019, pp. 83-98.
19. Schultz B. & Hobson B. & Kemp, Mathieu & Meyer J. & Moody R. & Pinnix H. & Clair M.. Multi-UUV missions using RANGER MicroUUVs, 2003.
20. Shinzaki, Dylan & Gage, Chris & Tang, Sarah & Moline, Mark & Wolfe, Barrett & Lowe, Christopher & Clark, Christopher. A multi-AUV system for cooperative tracking and following of leopard sharks, *Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013, pp. 4153-4158. Doi: 10.1109/ICRA.2013.6631163.

21. Leonard N.E., Paley D.A., Davis R.E., Fratantoni D.M., Lekien F. and Zhang F. Coordinated control of an underwater glider fleet in an adaptive ocean sampling field experiment in Monterey Bay, *J. Field Robotics*, 2010, Vol. 27, pp. 718-740. Doi: 10.1002/rob.20366.
22. Beloglazov D.A., Gayduk A.R., Kosenko E.Yu., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Solov'ev V.V., Titov A.E., Finaev V.I., Shapovalov I.O. Gruppovoe upravlenie podvizhnymi ob'ektami v neopredelennykh sredakh [Group control of mobile objects in indeterminate environments], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2015, 305 p.
23. RRTX: Asymptotically Optimal Single-Query Sampling-Based Motion Planning with Quick Replanning. Michael Otte and Emilio Frazzoli, *The International Journal of Robotics Research*, 2016, Vol. 29, Issue 7, pp. 797-822.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н. Л.А. Мартынова.

Маевский Андрей Михайлович – АО НПП ПТ «Океанос»; e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; Санкт-Петербург, Россия; м.н.с.; аспирант ЮФУ.

Морозов Роман Олегович – e-mail: morozov.r.o.23@yandex.ru; м.н.с.; аспирант ЮФУ.

Горелый Артем Евгеньевич – e-mail: gorelyj1409@gmail.com; магистрант БГТУ «Военмех»; инженер по робототехнике.

Рыжов Владимир Александрович – СПбГМТУ; e-mail: ryzhov@smtu.ru; Санкт-Петербург, Россия; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой.

Maevsky Andrey Mikhailovich – “Oceanos” JSC; e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; junior researcher; post-graduate student of SFedU.

Morozov Roman Olegovich – e-mail: morozov.r.o.23@yandex.ru; junior researcher; post-graduate student of SFedU.

Gorely Artem Evgenievich – e-mail: gorelyj1409@gmail.com; master's student of BSTU "Voenmeh"; robotics engineer.

Ryzhov Vladimir Alexandrovich – SMTU; e-mail: ryzhov@smtu.ru; Saint Petersburg, Russia; dr. of eng. sc.; professor; head of department.

УДК 007:621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-47-59

А.И. Наговицин, Б.Б. Молоткова

ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ НАЗЕМНЫХ РТК ВН СРЕДСТВАМ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОРАЖЕНИЯ (ПОДАВЛЕНИЯ) ПРОТИВНИКА

Проведен анализ уязвимых систем и элементов типового робототехнического комплекса. Сделан вывод о том, что наибольшую опасность представляют уязвимости каналов управления РТК ВН от средств радиоэлектронного подавления. Приведены классификация основных угроз для каналов управления РТК, а также результаты анализа возможных эффектов от воздействия описанных выше угроз на каждый из каналов. Проведена оценка эффективности канала радиопередачи при использовании станций активных маскирующих помех (САП), а также оценка эффективности функционирования канала передачи данных при применении САП. На основе оценки эффективности канала радиопередачи и канала передачи данных при применении противником станций активных маскирующих помех определена возможная зона эффективного управления, представляющая собой окружность различного радиуса с центром в точке расположения ПУ. С учетом общих технических требований к видам вооружения и военной техники сформулированы основные оперативно-тактические требования к системе противодействия РТК ВН в части радиоэлектронной защиты такие как электромагнитная совместимость (ЭМС), помехозащищенность и помехоустойчивость, радиотехническая маскировка радиоэлектронных средств (РЭС), зашумлен-