

18. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. About accuracy estimation of AUV single-beacon mobile navigation using ASV, equipped with DGPS, *OCEANS 2016. Shanghai, China*, 2016, pp. 1-4.
19. Yukhimets D., Zuev A., Gubankov A. Method of spatial path planning for mobile robot in unknown environment, *Proc. of the 28th DAAAM Int. Symp.*, 2017, pp. 0258-0267.
20. Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V. The Formation of Motion Laws for Mechatronics Objects Along the Paths with the Desired Speed, *Proc. of Int. Conf. on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA 2016)*, 2016, pp. 93-96.

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

Филаретов Владимир Федорович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ); e-mail: filaretov@inbox.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: 84232652424; д.т.н.; профессор; директор департамента.

Юхимец Дмитрий Александрович – e-mail: undim@dvo.ru; тел.: 84232313783; д.т.н.; доцент; в.н.с.

Зуев Александр Валерьевич – e-mail: alvzuev@yandex.ru; тел.: 84232432416; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Губанков Антон Сергеевич – e-mail: gubankov@dvo.ru; тел.: 89024884000; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Минаев Дмитрий Дмитриевич – Публичное акционерное общество «Дальприбор»; e-mail: minaev@dalpribor.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: 84232326368; к.т.н.; зам. главного конструктора.

Filaretov Vladimir Fedorovich – Far Eastern Federal University (FEFU); e-mail: filaretov@inbox.ru; Vladivostok, Russia; phone: +74232652424; dr. of eng. sc.; professor; director of the department.

Yukhimets Dmitry Aleksandrovich – e-mail: undim@dvo.ru; phone: +74232313783; dr. of eng. sc.; associate professor; leading researcher.

Zuev Alexander Valer'evich – e-mail: alvzuev@yandex.ru; phone: +74232432416; cand. of eng. sc.; associate professor; senior researcher.

Gubankov Anton Sergeevich – e-mail: gubankov@dvo.ru; phone: +79024884000; cand. of eng. sc.; associate professor; senior researcher.

Minaev Dmitry Dmitrievich – Public Joint Stock Company “Dalpribor”; e-mail: minaev@dalpribor.ru; Vladivostok, Russia; phone: +74232326368; cand. of eng. sc.; deputy chief designer.

УДК 004.896+629.58+001.891.57

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-93-101

В.С. Быкова, А.И. Машошин, И.В. Пашкевич

АЛГОРИТМ МАНЕВРИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ ПРОВОДКЕ СУДНА ЧЕРЕЗ ЗАМИНИРОВАННЫЙ РАЙОН*

Одной из задач, возлагаемых на автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), является борьба с минной опасностью, которая включает: 1) поиск и уничтожение мин в заминированном районе; 2) обеспечение собственной безопасности при проходе через заминированный район либо при работе в этом районе; 3) обеспечение проводки судов (включая подводные лодки) через заминированный район. АНПА можно рассматривать в качестве дальнейшего развития средств борьбы с минной опасностью, поскольку они имеют ряд преимуществ перед противоминными кораблями: 1) исключают гибель людей

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

при взрыве мины; 2) обладают более низким уровнем физических полей, на которые реагируют взрыватели морских мин; 3) способны маневрировать на оптимальной глубине для поиска и классификации мин. Ввиду этого создание специализированных АНПА для борьбы с минной опасностью весьма актуально. Поиск мин при помощи АНПА может осуществляться либо в интересах их уничтожения (разминирования района) либо в целях проводки судов (включая подводные лодки) через заминированный район. В настоящей статье рассматривается вторая задача. Приведено описание алгоритма маневрирования АНПА при обеспечении прохода судна через заминированный район. Задача решается путём обнаружения мин разных типов с использованием гидроакустических и магнитометрических средств поиска и классификации подводных объектов и их обхода на безопасном расстоянии. Для сокращения времени решения задачи классификация обнаруженных подводных объектов осуществляется на классы "миноподобный объект" и "прочие объекты". Использование класса "миноподобный объект", который включает как собственно мины, так и объекты, не отличимые от мин на дистанциях их обнаружения средствами поиска мин, позволяет не сближаться с обнаруженными подводными объектами на дистанцию их уверенной классификации с использованием высокочастотной гидроакустической и телевизионной аппаратуры и тем самым повысить безопасность АНПА и сократить время прохода через заминированный район. Алгоритм учитывает тот факт, что минимальная дистанция безопасного сближения типового судна с миной существенно превышает дистанции обнаружения мин разных типов, что не позволяет АНПА найти безопасный для судна проход через заминированный район путём его однократного пересечения и требует сложного маневрирования АНПА. Алгоритм предназначен для реализации в системе управления АНПА.

Автономный необитаемый подводный аппарат; морская мина; средства поиска морских мин; маневрирование АНПА при проходе через заминированный район.

V.S. Bykova, A.I. Mashoshin, I.V. Pashkevich

ALGORITHM FOR MANEUVERING AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE WHEN NAVIGATING A SHIP THROUGH A MINED AREA

One of the tasks assigned to the autonomous underwater vehicles (AUV) is the fight against mine danger, which includes: 1) search for and destroy mines in the mined area; 2) ensure their own safety when passing through the mined area or when working in this area; 3) ensure the navigation of ships (including submarines) through the mined area. AUV can be considered as a further development of mine-fighting equipment, since they have a number of advantages over mine-fighting ships: 1) exclude the loss of life in the event of a mine explosion; 2) have a lower level of physical fields to which the fuses of sea mines react; 3) are able to maneuver at the optimal depth for searching and classifying mines. In view of this, the creation of specialized AUV to combat the mine danger is very important. The search for mines with the help of AUV can be carried out either in the interests of their destruction (clearing the area) or for the purpose of guiding ships through the mined area. This article deals with the second problem. The description of the maneuvering algorithm of the AUV when ensuring the passage of a vessel through a mined area is given. The task is solved by detecting different types of mines using hydroacoustic and magnetometric means of searching and classifying underwater objects and bypassing of the mines at a safe distance. To reduce the time required to solve the task, the detected underwater objects are classified into the "mine-like object" and "other objects" classes. The use of the "mine-like object" class, which includes both the actual mines and objects that are indistinguishable from mines at the distances of their detection by means of mine search, allows you to avoid approaching detected underwater objects at a distance of their confident classification using high-frequency sonar and television equipment, and thereby increase the safety of the AUV and reduce the time of passage through the mined area. The algorithm takes into account the fact that the minimum safe distance between vessel and mine greatly exceeds the range of detection of mines of different types that does not allow AUV to find a safe vessel passage through the mined area by a single crossing and requires complex maneuvering of the AUV. Algorithm is intended for implementation in the AUV control system.

Autonomous underwater vehicle; sea mine; means of searching for sea mines; maneuvering AUV when passing through a mined area.

Введение. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективным средством исследования и освоения океана [1, 2]. Также они широко применяются в военных целях [3–5].

Одной из задач, возлагаемых на АНПА, является борьба с минной опасностью [3–6], которая включает:

- ◆ поиск и уничтожение мин в заминированном районе;
- ◆ обеспечение собственной безопасности при проходе через заминированный район либо при работе в этом районе;
- ◆ обеспечение проводки судов (включая подводные лодки) через заминированный район.

Минная опасность на море возникает как следствие войн, локальных конфликтов и угрозы их возникновения. Ввиду этого борьба с минной опасностью актуальна как в военное время, так и в мирное время после завершения конфликтов либо угрозы их возникновения.

Для борьбы с минной опасностью традиционно использовались тральщики. Однако ввиду изобретения мин, устойчивых к тралению, в последние десятилетия на их место пришли противоминные корабли, которые, не отказываясь от траления, ориентированы, в первую очередь, на поиск и уничтожение отдельных мин [7].

Современные морские мины делятся на плавающие, якорные, донные и заиленные (самозакапывающиеся в грунт) [8, 9]. Разновидностью донных мин являются мины-торпеды. Наибольшую трудность вызывает обнаружение донных и заиленных мин, но ещё большую трудность вызывает их классификация, поскольку их трудно отличить от разнообразных донных и заиленных объектов естественного и искусственного происхождения.

Морские мины оснащены взрывателями, реагирующими на изменение гидроакустического, магнитного либо сейсмического поля. Для надёжности срабатывания мины, как правило, оборудуются несколькими типами взрывателей одновременно.

Для поиска и классификации якорных и донных мин применяются высокочастотные гидролокаторы (в частности, вперёдсмотрящие гидролокаторы, многолучевые эхолоты, гидролокаторы бокового обзора), магнитометры и телевизионная аппаратура [10, 11]. Поиск заиленных мин осуществляется низкочастотными гидролокаторами (профилографами) и магнитометрами [12]. Учитывая, что заранее, как правило, не известно, какие мины установлены в районе, приходится одновременно осуществлять поиск всех типов мин с применением комплекса поисковой аппаратуры.

Поскольку дальность эффективного обнаружения и классификации донных и заиленных мин лежит в пределах от десятков до сотен метров, необходимо, чтобы носители технических средств их поиска и классификации двигались в непосредственной близости от дна. Для этого современные противоминные корабли оснащаются телеуправляемыми и буксируемыми подводными аппаратами, заглубляемыми на нужную глубину.

АНПА можно рассматривать в качестве дальнейшего развития средств борьбы с минной опасностью, поскольку они имеют ряд преимуществ перед противоминными кораблями [13–18]:

- ◆ исключают гибель людей при взрыве мины;
- ◆ обладают более низким уровнем физических полей, на которые реагируют взрыватели морских мин;
- ◆ способны маневрировать на оптимальной глубине для поиска и классификации мин.

Ввиду этого создание специализированных АНПА для борьбы с минной опасностью весьма актуально.

Поиск мин при помощи АНПА может осуществляться либо в интересах их уничтожения (разминирования района) либо в целях проводки судов (включая подводные лодки) через заминированный район. В настоящей статье рассматривается вторая задача.

Постановка задачи. При поиске мин самой сложной задачей является её классификация, которая должна отличить мину от разнообразных малогабаритных донных предметов естественного и искусственного происхождения. Для надёжной классификации мин применяются либо очень высокочастотные гидролокаторы с рабочей частотой в районе одного мегагерца либо телекамеры. Для использования этой аппаратуры необходимо сближение с обнаруженным объектом на расстояние в единицы метров и обход вокруг него, что, с одной стороны, не безопасно, а, с другой стороны, требует большого времени. При решении задачи классификации с целью уничтожения мин такие процедуры необходимы. Однако при решении задач, не связанных с уничтожением мин, можно предложить другой подход. В алфавит распознаваемых классов вместо класса «мина» вводится класс "миноподобный объект", который включает как собственно мины, так и объекты, не отличимые от мин на дистанциях их обнаружения средствами поиска мин, что позволяет не сближаться с обнаруженными подводными объектами на дистанцию их уверенной классификации с использованием высокочастотной гидроакустической и телевизионной аппаратуры и тем самым повысить безопасность АНПА и сократить время прохода через заминированный район. Заметим, что при отнесении обнаруженного объекта к классу "миноподобный объект" должны приниматься такие же действия, как и при обнаружении мины.

Традиционно проводка судов через заминированный район осуществлялась при помощи тральщика, который двигался впереди, буксируя трал [19, 20]. Однако с некоторых пор такой способ проводки стал неэффективным ввиду создания тралустойчивых мин и существенного увеличения радиуса их реагирования. Поэтому в настоящее время единственным способом проводки судов через заминированный район является обнаружение мин, установленных в районе, и прокладка маршрута судна на безопасном расстоянии от них. Рассмотрим решение этой задачи с использованием АНПА.

Алгоритм решения задачи. Перед АНПА стоит задача найти безопасный для проводимого судна проход через заминированный район, при этом судно должно минимально отклоняться от заданного генерального курса K_{gen} (рис. 1). Кроме того, ширина прохода в каждой точке маршрута должна быть не меньше удвоенной минимально допустимой дистанции приближения судна к мине R_{min} . Причём эта дистанция R_{min} , как правило, существенно превышает дистанции обнаружения всех типов мин.

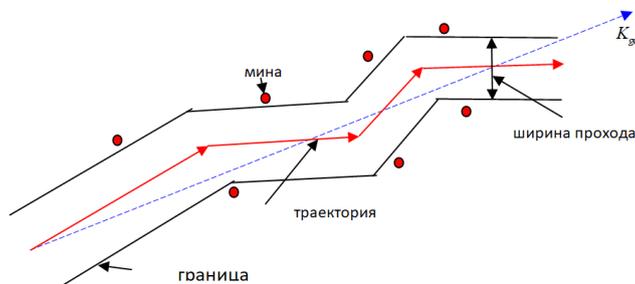


Рис. 1. Иллюстрация маршрута судна через заминированный район, проложенного АНПА

Последнее условие значительно усложняет алгоритм управления АНПА, поскольку не позволяет найти безопасный проход через заминированный район путём однократного прохода АНПА по нему. АНПА вынужден искать проход, осматривая его на всю ширину, двигаясь галсами, перпендикулярными заданному генеральному курсу судна.

Взаимодействие АНПА с проводимым судном выглядит следующим образом. При подходе к заминированному району судно стопорит ход, спускает на воду АНПА и ложится в дрейф в ожидании завершения работы АНПА по поиску безопасного прохода. АНПА, маневрируя определённым образом, ищет проход для судна, удовлетворяющий приведённым выше требованиям, и информацию о нём по радио либо гидроакустическому каналу сообщает на судно в виде координат обнаруженных мин и траектории движения судна через заминированный район. Судно, получив эту информацию, начинает движение по траектории, полученной от АНПА. Если заминированный район достаточно велик, проход судна через него может быть организован в несколько этапов с реализацией на каждом этапе описанного взаимодействия между судном и АНПА.

Идея алгоритма управления АНПА в рассматриваемом случае состоит в том, чтобы проложить кратчайший маршрут судна, при котором судно не приближается к минам на расстояние, меньшее чем R_{min} . Эта идея проиллюстрирована на рис. 2, на котором радиусы окружностей, построенных вокруг мин, равны R_{min} .

Рассмотрим, как должен маневрировать АНПА при прокладке маршрута, изображённого на рис. 2. Для начала подробно рассмотрим маневрирование АНПА до и после обнаружения первой мины (рис. 3). Обозначения на рис. 3: пунктирная линия изображает генеральный курс судна, чёрные сплошные линии – границы прохода, синяя линия – траектория АНПА, красная линия – траектория судна, красная точка – мина, радиус меньшей окружности равен дистанции обнаружения мины, радиус большей окружности – минимально допустимой дистанции между судном и миной R_{min} .

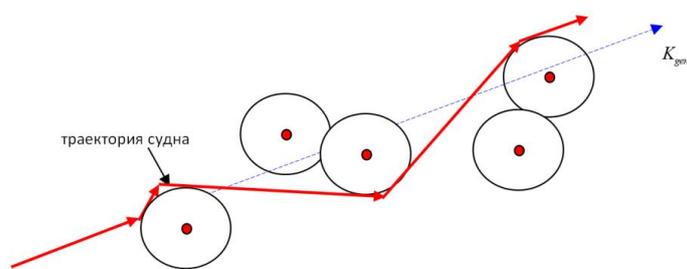


Рис. 2. Иллюстрация идеи алгоритма

В точке t_0 АНПА начинает движение галсами перпендикулярными заданному генеральному курсу прохода через район (синяя линия). Длина каждого галса равна заданной ширине прохода за вычетом удвоенной дистанции обнаружения мины. Расстояние между галсами равно удвоенной дистанции обнаружения мины. Одновременно с движением система управления АНПА строит траекторию движения судна (красная линия).

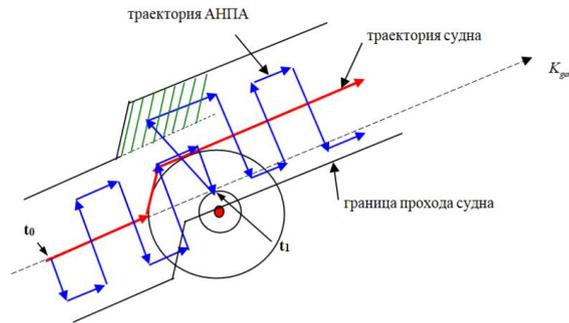


Рис. 3. Маневрирование АНПА до и после обнаружения 1-й мины (вариант 1)

В точке t_1 АНПА обнаруживает 1-ю мину. Система управления АНПА строит маршрут обхода судном обнаруженной мины, состоящий из двух галсов, проведенных по касательным к окружности большего радиуса. Причём курс, соответствующий второму галсу равен генеральному курсу судна. Одновременно с маршрутом обхода система управления строит границы прохода в процессе обхода мины. Далее система управления АНПА проверяет, вся ли площадь прохода обследована на предмет наличия мин. В результате проверки устанавливает, что заштрихованная зелёным цветом область прохода не обследована. Система управления рассчитывает траекторию АНПА, обеспечивающую просмотр не обследованной части прохода, и инициирует движение АНПА по этой траектории. После завершения просмотра не обследованной части прохода АНПА начинает маневрировать параллельными галсами, но уже в новых границах прохода.

Ситуация усложняется, если при просмотре не обследованной части прохода будет обнаружена новая мина (рис. 4).

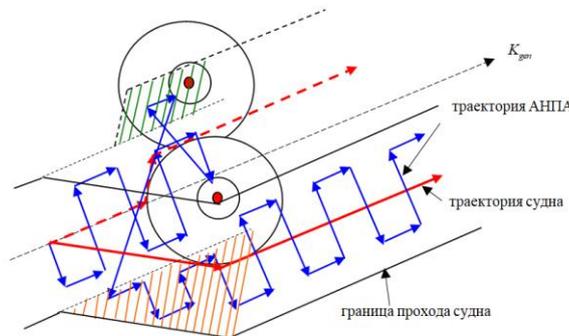


Рис. 4. Маневрирование АНПА до и после обнаружения 1-й мины (вариант 2)

В этом случае система управления АНПА корректирует траекторию судна при обходе 1-й обнаруженной мины (траектория судна, которая была построена до обнаружения 2-й мины показана штриховой красной линией, а новая траектория – сплошной красной линией). Также система управления АНПА выявляет не обследованную часть прохода судна, соответствующую новой траектории судна (заштрихована на рис. 4 светло коричневым цветом) и рассчитывает траекторию АНПА для её обследования с переходом на стандартное движение параллельным галсами поперёк построенной траектории судна. Если в процессе осмотра не обследованной части прохода будет обнаружена новая мина, описанные действия будут повторены.

Описанный алгоритм управления АНПА реализуется при обнаружении каждой новой мины. На рис. 5 показано маневрирование АНПА и построенный маршрут судна при проходе через район, в котором обнаружено 4 мины. Из рассмотрения рис. 5 следует, что при обнаружении каждой новой мины АНПА вынужден поворачивать назад для просмотра необследованной части прохода, построенного в результате обхода судном обнаруженной мины.

После преодоления всего заминированного района, как было отмечено выше, АНПА передаёт судну его маршрут и координаты обнаруженных мин.

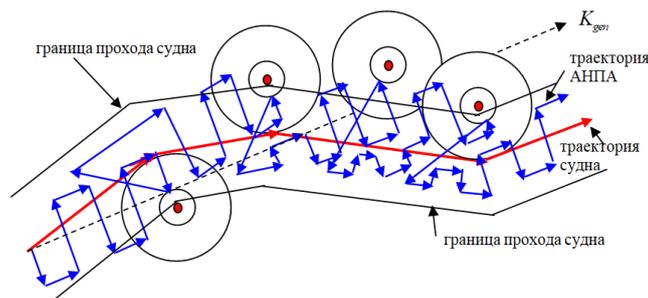


Рис. 5. Маневрирование АНПА при проходе заминированного района

Заключение. Одной из задач, возлагаемых на АНПА как в военное, так и в мирное время, является борьба с минной опасностью, состоящая как в поиске и уничтожении морских мин, так и в обеспечении проводки судов через заминированный район. Для решения этих задач АНПА оснащаются средствами поиска разного типа мин, а в систему управления АНПА закладываются алгоритмы маневрирования АНПА при решении этих задач.

В работе приведено описание реализуемого системой управления АНПА алгоритма маневрирования АНПА при обеспечении прохода (проводки) судна через заминированный район. Задача решается путём обнаружения мин разных типов с использованием гидроакустических и магнитометрических средств поиска и классификации подводных объектов и их обхода на безопасном расстоянии. Для сокращения времени решения задачи классификация обнаруженных подводных объектов осуществляется на классы "миноподобный объект" и "прочие объекты". Использование класса "миноподобный объект", который включает как собственно мины, так и объекты, не отличимые от мин на дистанциях их обнаружения средствами поиска мин, позволяет не сближаться с обнаруженными подводными объектами на дистанцию их уверенной классификации с использованием высокочастотной гидроакустической и телевизионной аппаратуры и тем самым повысить безопасность АНПА и сократить время прохода через заминированный район. Алгоритм учитывает тот факт, что минимальная дистанция безопасного сближения типового судна с миной существенно превышает дистанции обнаружения мин разных типов, что не позволяет АНПА найти безопасный для судна проход через заминированный район путём его однократного пересечения и требует сложного маневрирования АНПА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / отв. ред. Л.В. Киселев. – Владивосток: Дальнаука, 2018. – 368 с.
2. Боженов Ю.А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 4-68.
3. Jane's unmanned maritime vehicle. 2019-2020. Ed. Kelvin Wong. IHS Markit. 2020.
4. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век. – Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. – 304 с.

5. Белоусов И. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение. – 2013. – № 5. – С. 79-88.
6. Greenlaw J. Sea mines and naval mine countermeasures: are autonomous underwater vehicles the answer, and is the Royal Canadian Navy ready for the new paradigm? Canadian forces college. 2013.
7. Jane's fighting ships. 2019-2020. Ed. Alex Pape. IHS Markit. 2020.
8. Naval mine. – https://en.wikipedia.org/wiki/Naval_mine.
9. How do naval mines work. – <https://interestingengineering.com/how-do-naval-mines-work>.
10. Naval sonar ASW and mine hunting. – <https://www.kongsberg.com/maritime/products/naval-systems/ASW>.
11. Chapple P.B. Unsupervised detection of mine-like objects in seabed imagery from autonomous underwater vehicles // Proc. IEEE Oceans Conf. – 2009. – P. 1-6.
12. Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Результаты применения акустического профилографа для мониторинга морских акваторий с использованием алгоритмов синтеза и фокусировки // Подводные исследования и робототехника. – 2014. – № 1 (17). – С. 33-38.
13. Pinto M. Current and Future Generation of Unmanned MCM Integrated Systems // Proc. Undersea Defence Technology, Stockholm, Sweden from, 13 - 15 May. 2019.
14. Brothers R. MCM planning and evaluation for a UxV Toolbox in a variable mine threat and environment // Proc. Undersea Defence Technology, Stockholm, Sweden from, 13-15 May 2019.
15. Remotely Operated Vehicles for Mine Countermeasures Operations // Naval Forces. – 2013. – Vol. 34, No. 3. – P. 22-26.
16. Babel, Luitpold, Zimmermann T. Planning Safe Navigation Routes Through Mined Waters // European Journal of Operational Research. – February 2015. – Vol. 241, No. 1. – P. 99-108.
17. Krogstad T.R., Wiig M. Autonomous survey and identification planning for AUV MCM operations // Proc. Undersea Defence Technology, Liverpool, UK, 2014.
18. Wiig M., Krogstad T.R., Midtgaard Ø. Autonomous identification planning for mine countermeasure // Proc. Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, Southampton, UK, 2012.
19. Плехов А.М. Словарь военных терминов. – М.: Воениздат, 1988. – 337 с.
20. Хвоц В.А. Тактика ПЛ. – М.: Воениздат, 1989. – 264 с.

REFERENCES

1. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye [Underwater robotic complexes: systems, technologies, applications], the executive ed. L.V. Kiselev. Vladivostok: Dal'nauka, 2018, 368 z.
2. Bozhenov Yu.A. Ispol'zovanie avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov dlya issledovaniya Arktiki i Antarktiki [The use of autonomous uninhabited underwater vehicles for the study of the Arctic and Antarctic], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied hydrophysics], 2011, Vol. 4, No. 1, pp. 4-68.
3. Jane's unmanned maritime vehicle. 2019-2020. Ed. Kelvin Wong. IHS Markit. 2020.
4. Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Bocharov L.Yu. Ugroza iz glubiny: XXI vek [The threat from the deep: the XXI century]. Khabarovsk: KGUP «Khabarovskaya kraevaya tipografiya», 2011, 304 p.
5. Belousov I. Sovremennye i perspektivnye neobitaemye podvodnye apparaty VMS SShA [Modern and promising uninhabited underwater vehicles of the US Navy], *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign Military Review], 2013, No. 5, pp. 79-88.
6. Greenlaw J. Sea mines and naval mine countermeasures: are autonomous underwater vehicles the answer, and is the Royal Canadian Navy ready for the new paradigm? Canadian forces college. 2013.
7. Jane's fighting ships. 2019-2020. Ed. Alex Pape. IHS Markit. 2020.
8. Naval mine. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Naval_mine.
9. How do naval mines work. Available at: <https://interestingengineering.com/how-do-naval-mines-work>.
10. Naval sonar ASW and mine hunting. Available at: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/naval-systems/ASW>.

11. *Chapple P.B.* Unsupervised detection of mine-like objects in seabed imagery from autonomous underwater vehicles, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2009, pp. 1-6.
12. *Kasatkin B.A., Kosarev G.V.* Rezul'taty primeneniya akusticheskogo profilografa dlya monitoringa morskikh akvatoriy s ispol'zovaniem algoritmov sintezirovaniya i fokusirovki [Results of the application of an acoustic profiler for monitoring marine areas using synthesis and focusing algorithms], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2014, No. 1 (17), pp. 33-38.
13. *Pinto M.* Current and Future Generation of Unmanned MCM Integrated Systems // Proc. Undersea Defence Technology, Stockholm, Sweden from, 13 - 15 May. 2019.
14. *Brothers R.* MCM planning and evaluation for a UxV Toolbox in a variable mine threat and environment, *Proc. Undersea Defence Technology, Stockholm, Sweden from, 13-15 May 2019.*
15. Remotely Operated Vehicles for Mine Countermeasures Operation, *Naval Forces*, 2013, Vol. 34, No. 3, pp. 22-26.
16. *Babel, Luitpold, Zimmermann T.* Planning Safe Navigation Routes Through Mined Water, *European Journal of Operational Research*, February 2015, Vol. 241, No. 1, pp. 99-108.
17. *Krogstad T.R., Wiig M.* Autonomous survey and identification planning for AUV MCM operations // Proc. Undersea Defence Technology, Liverpool, UK, 2014.
18. *Wiig M., Krogstad T.R., Midtgaard Ø.* Autonomous identification planning for mine countermeasure, *Proc. Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, Southampton, UK, 2012.*
19. *Plekhov A.M.* Slovar' voennykh terminov [Dictionary of military terms]. Moscow: Voenizdat, 1988, 337 p.
20. *Khvoshch V.A.* Taktika PL [Tactics of PL]. Moscow: Voenizdat, 1989, 264 p.

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

Быкова Валентина Сергеевна – АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"; e-mail: zvs2011@yandex.ru; Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79213502298; инженер-программист.

Машошин Андрей Иванович – e-mail: aimashoshin@mail.ru; тел.: +79217632345; начальник научно-исследовательского центра; д.т.н.; профессор.

Пашкевич Иван Владимирович – e-mail: iv@bk.ru; тел.: +79119330006; главный специалист.

Bykova Valentina Sergeevna – JSC "Concern" Central research Institute "Electropribor"; e-mail: zvs2011@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79213502298; software engineer.

Mashoshin Andrei Ivanovich – e-mail: aimashoshin@mail.ru; phone: +79217632345; head of the research center; dr. of eng. sc.; professor.

Pashkevich Ivan Vladimirovich – e-mail: iv@bk.ru; phone: +79119330006; chief specialist.

УДК 681.5.01

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-101-112

В.В. Косьянчук, В.В. Гласов, Е.Ю. Зыбин, Л. Тань

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ПОЛНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ*

Большинство методов прогнозирования поведения динамических систем основаны на использовании информации о параметрах их математических моделей. Однако проблемы нестационарности, нелинейности и неидентифицируемости моделей реальных сложных систем приводят к тому что, традиционные параметрические методы применимы на практике только тогда, когда достоверно известны параметры и структура моделей систем, а неопределенности при постановке задачи существенно ограничены. В статье

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 20-58-53059.