

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПРОВОДКИ СУДОВ ЧЕРЕЗ ЗАМИНИРОВАННЫЙ РАЙОН

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

Приведено описание алгоритмов маневрирования автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) при проходе через заминированный район и при обеспечении прохода судна через заминированный район. Обе задачи решаются путём обнаружения мин разных типов с использованием гидроакустических и магнитометрических средств поиска и классификации подводных объектов и их обхода на безопасном расстоянии. 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 проводки судна (судов) через заминированный район учитывает тот факт, что минимальная дистанция безопасного сближения типового судна с миной многократно 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. Кроме того, учитываются ошибки позиционирования АНПА и судна. Алгоритмы предназначены для реализации в системе управления АНПА.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, морская мина, средства поиска морских мин, маневрирование АНПА при проходе через заминированный район.

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 сложность вызывает их классификация, поскольку их трудно отличить от разнообраз-

ных 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, неизвестно, 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:

- 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.

Для уничтожения мин применяются специальные маломощные заряды, которые устанавливаются вблизи от мин и взрываются по команде, передаваемой по гидроакустическому каналу. В этом случае функции АНПА, осуществляющего поиск и классификацию мин, ограничиваются установкой акустического маяка в месте расположения обнаруженной мины, по которому наводится АНПА – уничтожитель мин.

Вопросам обнаружения и классификации якорных и донных мин посвящено большое число публикаций, например, [13–27], из анализа которых можно

сделать вывод, что на сегодняшний день наиболее эффективными методами решения задачи являются использование гидролокаторов с синтезированной апертурой и применение нейросетевых алгоритмов с глубоким обучением. Публикации, посвящённые поиску заиленных мин, достаточно редкие.

При поиске мин самой сложной задачей является их 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. В качестве классификационных признаков мин используются: их геометрический размер, отстояние от дна, характерная форма, эквивалентный радиус, акустическая жёсткость. Эффективным методом классификации мин является регулярное обновление карты расположения донных объектов в назначенном районе с выявлением новых донных объектов и их углублённой классификацией.

Для надёжной классификации мин необходимо сближение с обнаруженным объектом на расстояние в десятки метров и обход вокруг него, что, с одной стороны, небезопасно, а с другой стороны, требует большого времени. При решении задачи классификации с целью уничтожения мин такие процедуры необходимы. В задачах, не связанных с уничтожением мин, вводится класс «миноподобный объект», включающий мины и объекты, неотличимые от мин на дистанциях их обнаружения. Это позволяет не сближаться с обнаруженными объектами на дистанцию их уверенной классификации. Заметим, что при отнесении обнаруженного объекта к классу «миноподобный объект» должны приниматься такие же действия, как и при обнаружении мины.

Для решения перечисленных выше задач борьбы с минной опасностью система управления АНПА должна обеспечить соответствующее маневрирование. Вопросы маневрирования АНПА при решении различных задач рассмотрены в значительном числе работ, например [1, 28, 29]. При решении задачи поиска и уничтожения мин в заминированном районе, если известны только границы района, выбор способа маневрирования трудностей не вызывает: им может быть любой способ, описанный в литературе и обеспечивающий просмотр всей площади района, например, движение параллельными галсами (по мандру) с расстоянием между галсами, равным ширине просматриваемой полосы.

При проходе АНПА через заминированный район и при проводке судов через него требуется более

сложное маневрирование. Найти его описание в доступных публикациях не удалось. Ввиду этого целью работы является описание разработанных авторами алгоритмов маневрирования АНПА при решении этих двух задач.

1. Алгоритм маневрирования АНПА при проходе через заминированный район

Пусть АНПА должен пересечь район, в котором, предположительно, установлены мины, заданным генеральным курсом $K_{AUV/gen}$.

На АНПА, оборудованный средствами автономной навигации, установлены гидроакустические средства обнаружения мин всех типов, обеспечивающие гарантированную (т.е. минимальную) дистанцию обнаружения мины D_{det} .

Классификация обнаруженных объектов должна осуществляться на классы «миноподобный объект» и «не мина». (Для краткости изложения в дальнейшем миноподобный объект будем называть миной).

Предполагается, что физические поля АНПА таковы, что приближение АНПА к мине на дистанцию её обнаружения D_{det} (но не менее) безопасно для АНПА.

Алгоритм управления маневрированием АНПА должен обеспечивать пересечение района, минимально отклоняясь от генерального курса.

Выполнение данного критерия означает следующее:

- при входе в район АНПА движется заданным генеральным курсом;
- при обнаружении мины АНПА обходит её, не приближаясь к ней. Направление обхода выбирается из условия минимального времени обхода;
- после обхода мины АНПА ложится на генеральный курс.

Иллюстрация реализации данного алгоритма приведена на рис. 1. Рис. 1, а показывает случай расположения мин на значительном удалении друг

от друга. Однако возможны случаи, когда мины находятся в непосредственной близости друг от друга и образуют так называемые ловушки, для преодоления которых требуется более сложное маневрирование АНПА. Пример такой ловушки изображён на рис. 1, б. АНПА обнаруживает 1-ю мину и начинает её обходить. При обходе обнаруживает 2-ю мину и при её обходе обнаруживает 3-ю мину, обходить которую приходится курсом, обратным генеральному курсу. Заметим, что при обнаружении 2-й мины напрашивается выбор курса, обеспечивающего проход между 1-й и 2-й минами. Однако такой курс нарушает условие не приближаться к обнаруженной мине.

Заметим, что при самостоятельном проходе АНПА через заминированный район не предъявляются высокие требования к точности навигации АНПА, поскольку реализуется простое правило маневрирования: обнаружив мину, сразу поверни на курс, перпендикулярный линии пеленга на неё.

2. Алгоритм маневрирования АНПА при проводке судна через заминированный район

Более сложной задачей является проводка судов (включая подводные лодки) через заминированный район. Традиционно эта задача решалась при помощи тральщика, который двигался впереди, буксируя трал [30, 31]. Однако с некоторых пор такой способ проводки стал неэффективным ввиду создания тралостойчивых 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.

Перед АНПА, оборудованным средствами высокоточной автономной навигации и средствами обнаружения мин различных типов, стоит задача най-

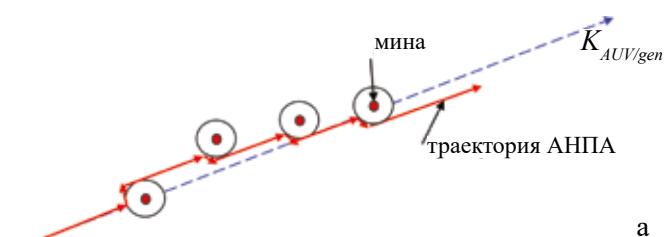


Рис. 1. Траектория движения АНПА при проходе через заминированный район (окружности вокруг мин показывают дистанцию её обнаружения гидроакустическими средствами АНПА)

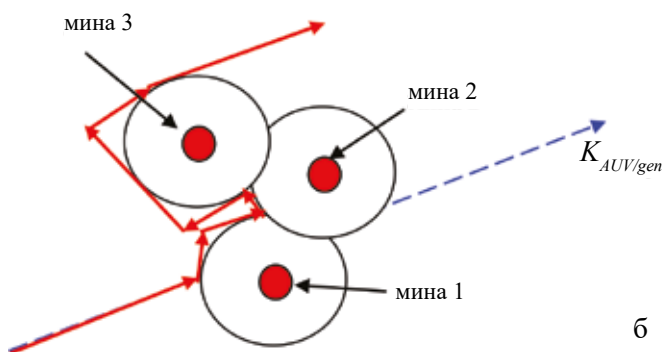
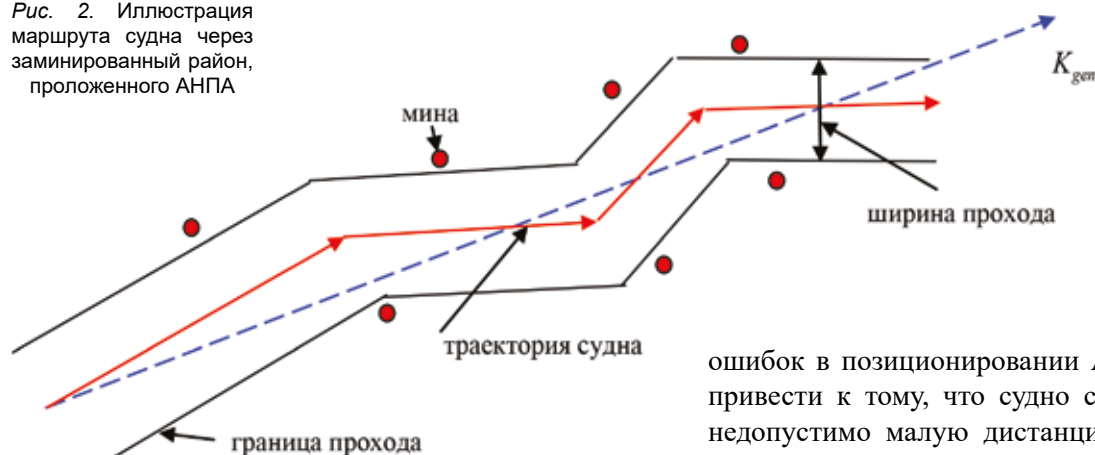


Рис. 2. Иллюстрация маршрута судна через заминированный район, проложенного АНПА



ти безопасный для проводимого судна проход через заминированный район шириной W , превышающей удвоенную минимально допустимую дистанцию приближения судна к mine R_{dop} . При этом судно должно минимально отклоняться от заданного генерального курса K_{gen} (рис. 2).

При разработке алгоритма маневрирования АНПА в этом случае необходимо учесть следующие факторы.

1. Минимально допустимая дистанция приближения судна к mine R_{dop} , как правило, существенно (до десяти раз и более) превышает гарантированную дистанцию обнаружения mine D_{det} . Данный фактор значительно усложняет алгоритм маневрирования 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.

2. Существенными факторами, влияющими на безопасность проводки судна, являются точность прокладки маршрута, зависящая от точности позиционирования АНПА в процессе прокладки, и точность движения судна по этому маршруту, определяемая точностью позиционирования судна в процессе движения через заминированный район. Наличие

ошибок в позиционировании АНПА и судна может привести к тому, что судно сблизится с mine на недопустимо малую дистанцию и подорвётся. Избежать этого можно, если минимально допустимую дистанцию приближения судна к mine R_{dop} увеличить на сумму предельных ошибок позиционирования АНПА ($\Delta R_{max/AUV}$) и судна ($\Delta R_{max/ship}$), т.е.

$$R_{min} = R_{dop} + \Delta R_{max/AUV} + \Delta R_{max/ship}, \quad (1)$$

где R_{min} – минимально допустимая дистанция приближения судна к mine с учётом ошибок позиционирования АНПА и судна.

Тогда ширину искомого прохода через район можно рассчитать по формуле:

$$W = 2 \cdot R_{min} \quad (2)$$

При этом предельные ошибки позиционирования АНПА и судна должны рассчитываться с учётом характеристик их инерциальных навигационных систем и лага, характеристик течения, времени нахождения в районе, возможности выполнения обсервации в процессе прохода через район.

В результате 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 согласует свои координаты с координатами судна и начинает маневрировать в поисках

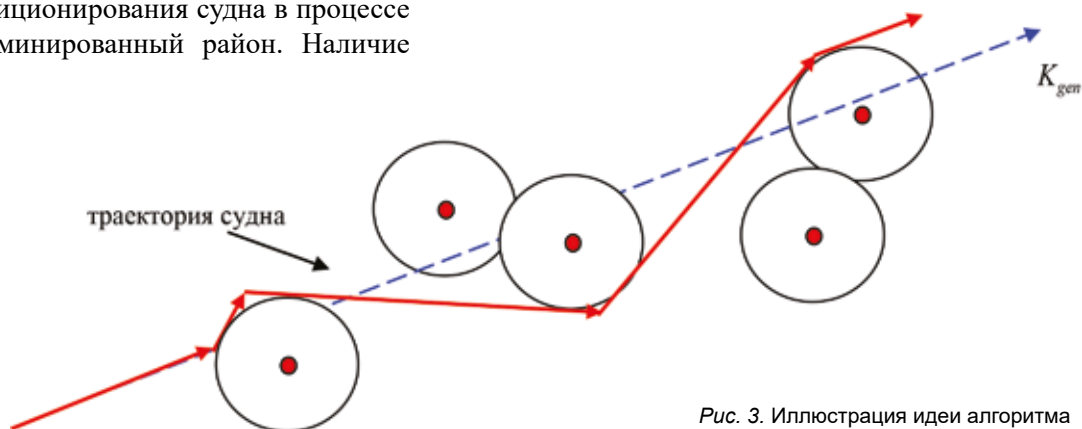


Рис. 3. Иллюстрация идеи алгоритма

прохода для судна, удовлетворяющего приведённым выше требованиям. По завершении построения прохода АНПА всплывает на поверхность, ложится в дрейф и по радио сообщает на судно координаты обнаруженных мин и траекторию движения судна через заминированный район. Судно, получив эту информацию, начинает движение по траектории, полученной от АНПА. Выйдя из заминированного района, судно берёт АНПА на борт. 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 маневрирования 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. 3, на котором радиусы окружностей, построенных вокруг мин, равны D_{det} (меньшей) и R_{min} (большой).

Рассмотрим, как должен маневрировать АНПА при прокладке маршрута, изображённого на рис. 3. Для начала подробно рассмотрим маневрирование АНПА до и после обнаружения первой мины (рис. 4). Обозначения на рис. 4: 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 с учётом возможных ошибок позиционирования АНПА и судна R_{min} .

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 минимальной дис-

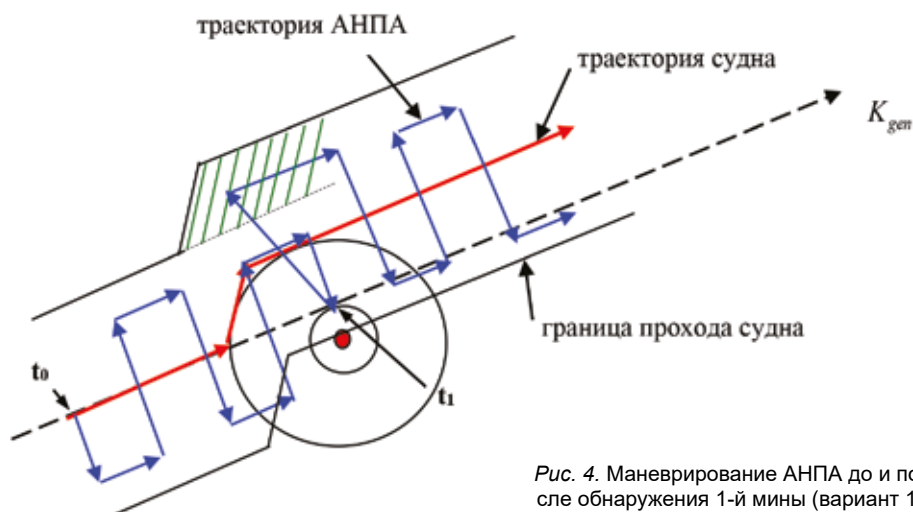


Рис. 4. Маневрирование АНПА до и после обнаружения 1-й мины (вариант 1)

танции обнаружения мины D_{det} . Расстояние между галсами равно удвоенной минимальной дистанции обнаружения мины. Одновременно с движением система управления АНПА строит траекторию движения судна (красная линия).

В точке t_1 АНПА, находясь от первой мины на дистанции её обнаружения, обнаруживает её. Система управления АНПА строит маршрут обхода судном обнаруженной мины, состоящий из двух галсов, проведённых по касательным к окружности большего радиуса. Причём курс, соответствующий первому галсу, перпендикулярен линии пеленга на обнаруженную мину, а 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

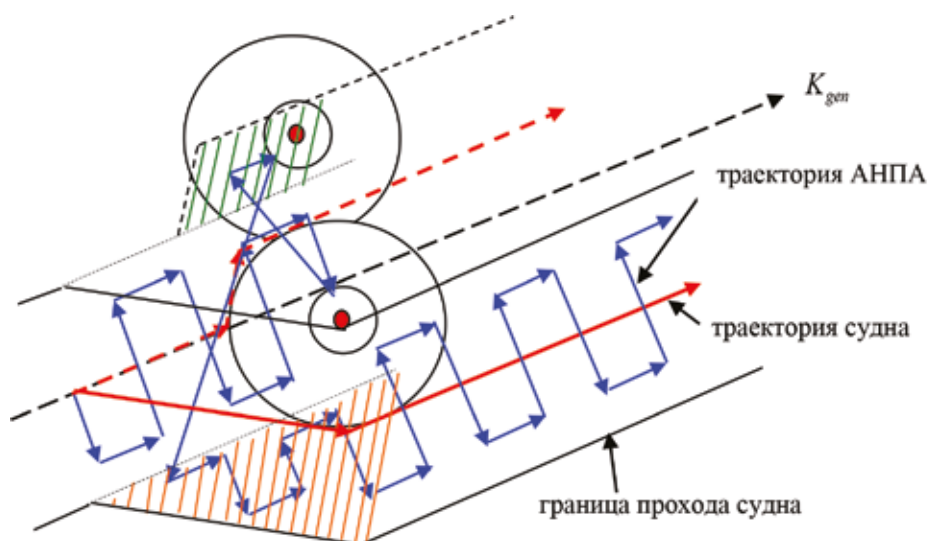


Рис. 5. Маневрирование АНПА до и после обнаружения 1-й мины (вариант 2)

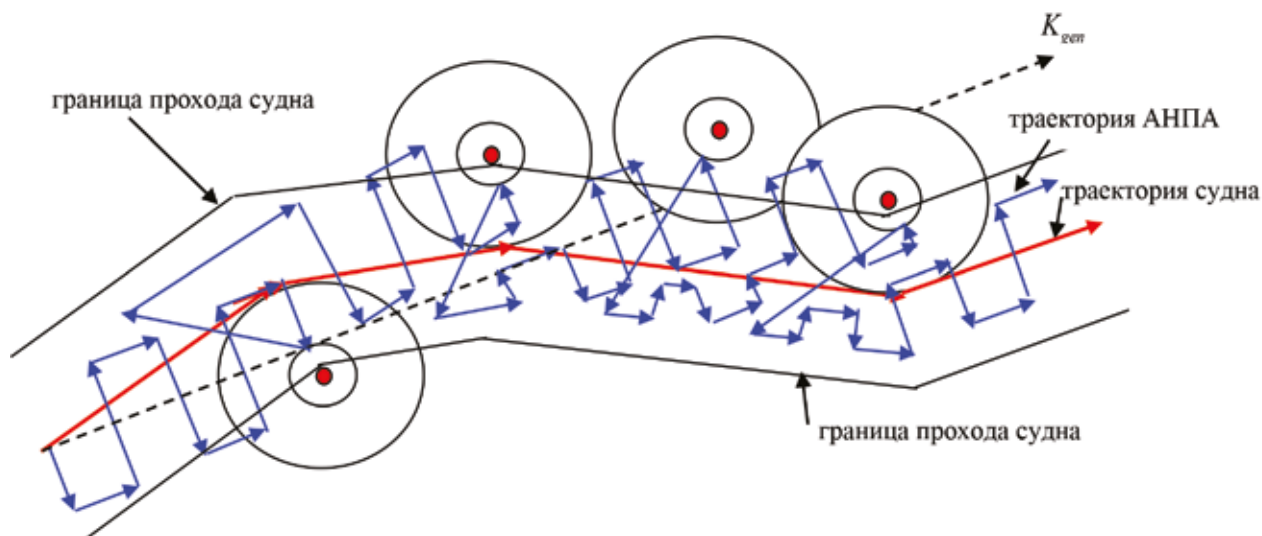


Рис. 6. Маневрирование АНПА при проходе заминированного района

область прохода не обследована. Система управления рассчитывает траекторию АНПА, обеспечивающую просмотр необследованной 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 необследованной части прохода будет обнаружена новая мина (рис. 5). 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 необследованную часть прохода судна, соответствующую новой траектории судна (заштрихована на рис. 5 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 необследованной части прохода будет обнаружена новая мина, описанные действия будут повторены.

Описанный алгоритм маневрирования АНПА реализуется при обнаружении каждой новой мины. На рис. 6 показаны маневрирование АНПА и построенный маршрут судна при проходе через район, в котором обнаружено 4 мины. Из рассмотрения рис. 6 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 суд-

ну его маршрут и координаты обнаруженных мин.

Представляет интерес оценка времени поиска прохода через заминированный район. Как видно из рис. 6, это время зависит от размера района вдоль заданного генерального курса L , скорости АНПА V , минимально допустимой дистанции приближения судна к мине R_{min} , дистанции обнаружения мины D_{det} и количества обнаруженных мин N . Рассмотрим крайний случай, когда при поиске прохода не обнаружено ни одной мины. Тогда нетрудно показать, что время поиска прохода T составит

$$T = \frac{L}{V} \cdot \frac{R_{min}}{D_{det}}, \quad (3)$$

т.е. время поиска прохода как минимум в $\frac{R_{min}}{D_{det}}$ раз превышает время пересечения района генеральным курсом.

При обнаружении N мин время поиска прохода приблизительно составит величину

$$T \approx \frac{L + 2 \cdot R_{min} \cdot N}{V} \cdot \frac{R_{min}}{D_{det}}. \quad (4)$$

Поскольку отношение $\frac{R_{min}}{D_{det}}$ может достигать десяти и более и, как следствие, время T может быть достаточно большим, актуален поиск путей сокращения этого времени. В первую очередь напрашивается применение для поиска прохода через заминированный район группы АНПА. Это в принципе возможно и целесообразно, но потребует разработки достаточно сложных алгоритмов группового управления АНПА с применением сетевой гидроакустической связи и высокоточного взаимного позиционирования АНПА [32]. Авторы планируют решить эту задачу в своих последующих работах.

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 собственного прохода, а также проводки судов через заминированный район. Для решения этих задач АНПА оснащаются средствами высокоточной автономной навигации и средствами поиска разного типа мин, а в систему управления АНПА закладываются алгоритмы маневрирования АНПА при решении этих задач.

В работе приведено описание реализуемых системой управления АНПА алгоритмов маневрирования АНПА при проходе АНПА через заминированный район и при проводке судна через заминированный район с учётом минимально безопасной дистанции приближения судна к мине, гарантированной дистанции обнаружения мины и точности позиционирования АНПА и судна.

В последующих работах авторы планируют рассмотреть алгоритмы управления группой АНПА при проводке судов через заминированный район.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк [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. Coulsdon, Surrey, UK, 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. Toronto, Ontario, Canada. 2013.
7. Jane's fighting ships. 2019-2020 / Ed. Alex Pape. IHS Markit. Coulsdon, Surrey, UK. 2020.
8. Naval mine. – https://en.wikipedia.org/wiki/Naval_mine (дата обращения: 03.03.2021).
9. How do naval mines work. – <https://interestingengineering.com/how-do-naval-mines-work> (дата обращения: 03.03.2021).
10. Naval sonar ASW and mine hunting. – <https://www.kongsberg.com/maritime/products/naval-systems/ASW> (дата обращения: 03.03.2021).
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 синтезирования и фокусировки // *Подводные исследования и робототехника*. 2014. № 1(17). С. 33–38.
13. Williams D.P. Underwater target classification in synthetic aperture sonar imagery using deep convolutional neural networks // *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition. Tlaquepaque, Jalisco, Mexico*. 2016. P. 2497–2502.
14. Zhu P., Isaacs J., Fu B., Ferrari S. Deep learning feature extraction for target recognition and classification in underwater sonar images. *Proc. IEEE Annual Conf. Decision and Control. Melbourne, Australia*. 2017. P. 2724–2731.
15. Denos K., Ravaut M., Fagette A., Lim H. Deep learning applied to underwater mine warfare // *Proc. IEEE Oceans Conf. Aberdeen, Scotland*. 2017. P. 1–7.
16. Chapple P.B., Dell T., Bongiorno D. Enhanced detection and classification of mine-like objects using situational awareness and deep learning // *Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition. Island of Skiathos, Greece*. 2017. P. 529–536.
17. Williams D.P., Hamona R., Gergb I.D. On the benefit of multiple representations with convolutional neural networks for improved target classification using sonar data // *Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition. Hersonissos, Crete*. 2019. P. 187–194.
18. Hayes M., Gough P. Broad-band synthetic aperture sonar // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1992. V.17 (1). P.80–94.
19. Plotnick D., Marston T. Utilization of aspect angle information in synthetic aperture images // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. 2018. Vol. 56 (9). P. 5424–5432.
20. Williams D. Exploiting phase information in synthetic aperture sonar images for target classification // *Proc. IEEE Oceans Conf. Kobe, Japan*. 2018. P. 1–6.
21. Williams D. Underwater target classification in synthetic aperture sonar imagery using deep convolutional neural networks // *Proc. of ICPR*. 2016.
22. Emigh M., Marchand B., Cook M., Prater J.. Supervised deep learning classification for multi-band synthetic aperture sonar // *Proc. 4-th Intern. Conf. on SAS/SAR*. 2018. Vol. 40. P. 140–147.
23. Gerg I., Williams D. Additional representations for improving synthetic aperture sonar classification using convolutional neural networks // *Proc. 4-th Intern. Conf. on SAS/SAR*. 2018. Vol. 40. P. 11–22.
24. Carmichael D., Linnett L., Clarke S., Calder B. Seabed classification through multifractal analysis of sidescan sonar imagery // *IEE Proc. Radar, Sonar and Navigation*. 1996. Vol. 143(3). P. 140–148.
25. Kohntopp D., Lehmann B., Kraus D., Birk A. Seafloor classification for mine countermeasures operations using synthetic aperture sonar images // *Proc. IEEE Oceans Conf. Aberdeen, Scotland*. 2017. P. 1–5.
26. Groen J., Coiras E. Del Rio Vera J., Evans B. Model-based sea mine classification with synthetic aperture sonar // *IEE Proc. Radar, Sonar, Navigation*. 2010. Vol. 4 (1). P. 62–73.
27. Williams D.P., Hamon R., Gerg I. On the benefit of multiple representations with convolutional neural networks for improved target classification using sonar data // *Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition. Hersonissos, Crete*. 2019.
28. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Планирование и реализация траекторий движения автономного подводного робота при выполнении мониторинга в акваториях различных типов // *Подводные исследования и робототехника*. 2016. № 2 (22). С. 25–35.
29. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Алгоритмы обхода локальных донных объектов для автономного подводного робота // *Шестая Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана» (ТПОМО-6)*. Владивосток, 2015. С. 450–454.
30. Плехов А.М. Словарь военных терминов, М.; Воениздат, 1988. 337с.
31. Хвоц В.А. Тактика ПЛ. М.: Воениздат. 1989. 264 с.
32. Кебал К.Г., Машоин А.И., Мороз Н.В. Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования // *Гирроскопия и навигация*. 2019. Т. 27, № 2 (105). С. 106–135.

Об авторах

Быкова Валентина Сергеевна, инженер-программист
АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"

Области научных интересов: системы распознавания и управления

Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30

E-mail: zvs2011@yandex.ru

Тел.: +7(921)350-22-98

ORCID ID: 0000-0003-1633-2758

Машошин Андрей Иванович, доктор технических наук, профессор, начальник научно-исследовательского центра

АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"

Области научных интересов: гидроакустика, системы распознавания и управления, моделирование, робототехника

Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30

E-mail: aimashoshin@mail.ru

Тел.: +7(921)763-23-45

ORCID ID: 0000-0002-4785-966X

Пашкевич Иван Владимирович, главный специалист
АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"

Области научных интересов: гидроакустика, робототехника,

Адрес: 197046, г. Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, д. 30

E-mail: iv@bk.ru

Тел.: +7(911)933-00-06

ORCID ID: 0000-0002-6706-5592

Для цитирования:

Быкова В.С., Машошин А.И., Пашкевич И.В. ПРИМЕНЕНИЕ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПРОВОДКИ СУДОВ ЧЕРЕЗ ЗАМИНИРОВАННЫЙ РАЙОН // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 1(35). С. 31–40. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_03



THE USE OF THE AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE FOR NAVIGATING A SHIP THROUGH A MINED AREA

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

The article describes the algorithms for maneuvering an Autonomous underwater vehicle (AUV) when passing through a mined area and when ensuring the passage of a vessel through a mined area. Both tasks are 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 both tasks, 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 ensuring the passage of a vessel through the mined area 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. Algorithms are intended for implementation in the AUV control system.

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

Recommended citation:

Bykova V.S., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V. THE USE OF THE AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE FOR NAVIGATING A SHIP THROUGH A MINED AREA. *Underwater Investigation and Robotics*. 2021. No. 1 (35). P. 31–40. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_03

References

- Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. *Podvodnye robotekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye*. [ed. by L.V. Kiselev]; Institute for Marine Technology Problems FEB RAS. Vladivostok, 2018. 368 p.
- Bozhenov Yu.A. *Ispol'zovanie avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov dlya issledovaniya Arktiki i Antarktiki. Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*. 2011. Vol. 4, No 1. P. 4–68.
- Jane's unmanned maritime vehicle. 2019–2020. Ed. Kelvin Wong. IHS Markit. 2020.
- Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Bocharov L.Yu. *Ugroza iz glubiny: XXI vek*. Khabarovsk: *Khabarovskaya kraevaya tipografiya*, 2011. 304 p.
- Belousov I. *Sovremennyye i perspektivnyye neobitaemye podvodnyye apparaty VMS SSHA. Zarubezhnoye voennoye obozreniye*. 2013. No. 5. P. 79–88.
- 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.
- Jane's fighting ships. 2019–2020. Ed. Alex Pape. IHS Markit. 2020.
- Naval mine. https://en.wikipedia.org/wiki/Naval_mine.
- How do naval mines work. <https://interestingengineering.com/how-do-naval-mines-work>.
- Naval sonar ASW and mine hunting. <https://www.kongsberg.com/maritime/products/naval-systems/ASW>.
- Chapple P.B. Unsupervised detection of mine-like objects in seabed imagery from autonomous underwater vehicles. *Proc. IEEE Oceans Conf.* 2009. P. 1–6.
- Kasatkin B.A., Kosarev G.V. The application results of sea water areas monitoring with acoustic profiler using algorithms of synthesizing and focusing. *Underwater Investigations and Robotics*. 2014. No. 1(17). P. 33–38.
- Williams D.P. Underwater target classification in synthetic aperture sonar imagery using deep convolutional neural networks. *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition*. 2016. P. 2497–2502.
- Zhu P., Isaacs J., Fu B., Ferrari S. Deep learning feature extraction for target recognition and classification in underwater sonar images. *Proc. IEEE Annual Conf. Decision and Control*. 2017. P. 2724–2731.
- Denos K., Ravaut M., Fagette A., Lim H. Deep learning applied to underwater mine warfare. *Proc. IEEE Oceans Conf.* 2017. P. 1–7.
- Chapple P.B., Dell T., Bongiorno D. Enhanced detection and classification of mine-like objects using situational awareness and deep learning. *Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition*. 2017. P. 529–536.

17. Williams D.P., Hamona R., Gergb I.D. On the benefit of multiple representations with convolutional neural networks for improved target classification using sonar data. Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition. 2019. P. 187–194.

18. Hayes M., Gough P. Broad-band synthetic aperture sonar. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1992. Vol. 17(1). P. 80–94.

19. Plotnick D., Marston T. Utilization of aspect angle information in synthetic aperture images. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2018. Vol. 56(9). P. 5424–5432.

20. Williams D. Exploiting phase information in synthetic aperture sonar images for target classification. Proc. IEEE Oceans. 2018. P. 1–6.

21. Williams D. Underwater target classification in synthetic aperture sonar imagery using deep convolutional neural networks. Proc. of ICPR. 2016.

22. Emigh M., Marchand B., Cook M., Prater J. Supervised deep learning classification for multi-band synthetic aperture sonar. Proc. 4th International Conference on SAS/SAR. 2018. Vol. 40. P. 140–147.

23. Gerg I., Williams D. Additional representations for improving synthetic aperture sonar classification using convolutional neural networks. Proc. 4th International Conference on SAS/SAR. 2018. Vol. 40. P. 11–22.

24. Carmichael D., Linnett L., Clarke S., Calder B. Seabed classification through multifractal analysis of sidescan sonar imagery. IEE Proc. Radar, Sonar and Navigation. 1996. Vol. 143(3). P. 140–148.

25. Kohntopp D., Lehmann B., Kraus D., Birk A. Seafloor classification for mine countermeasures operations using synthetic aperture sonar images. Proc. OCEANS. 2017. P. 1–5.

26. Groen J., Coiras E. Del Rio Vera J., Evans B. Model-based sea mine classification with synthetic aperture sonar. IEE Proc. Radar, Sonar, Navigation. 2010. Vol. 4(1). P. 62–73.

27. Williams D.P., Hamon R., Gerg I. On the benefit of multiple representations with convolutional neural networks for improved target classification using sonar data. Proc. Underwater Acoustics Conference, 2019.

28. Inzartsev A.V., Bagnitckii A.V. Motion path planning and implementation for AUV when monitoring in various types of water areas. Underwater Investigations and Robotics. 2016. No. 2 (22). P. 25–35.

29. Inzartsev A.V., Bagnitckii A.V. *Algoritmy obhoda lokal'nyh donnykh ob'ektov dlya avtonomnogo podvodnogo robota. Shestaya vseros. nauch.-tekhn. konf. «Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana»*. Vladivostok. 2015. P. 450–454.

30. Plekhov A.M. *Slovar' voennykh terminov*, M.: Voenizdat, 1988. 337 p.

31. Hvoshch V.A. Taktika PL. M.: Voenizdat, 1989. 264 p.

32. Kebkal K.G., Mashoshin A.I., Moroz N.V. Solutions for underwater communication and positioning network development. Gyroscopy and Navigation. 2019. Vol. 27. № 2 (105). P. 106–135.

About the authors

Bykova Valentina Sergeevna, program engineer,
JSC «Concern «Elektropribor»,
Scientific interests in pattern recognition and control systems,
Address: 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30
E-mail: zvs2011@yandex.ru
Phone: +7(921)350-22-98
ORCID ID: 0000-0003-1633-2758

Mashoshin Andrei Ivanovich, Dr. Sc., professor, chief of the research center
JSC «Concern «Elektropribor»
Scientific interests in underwater acoustics, pattern recognition and control systems
Address: 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30
E-mail: aimashoshin@mail.ru
Phone: +7(921)763-23-45
ORCID ID: 0000-0002-4785-966X

Pashkevich Ivan Vladimirovich, chief specialist
JSC «Concern «Elektropribor»
Scientific interests in underwater acoustics and control systems
Address: 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya str., 30
E-mail: iv@bk.ru
Phone: +7(911)933-00-06
ORCID ID: 0000-0002-6706-5592

