

О ПОИСКЕ ИСТОЧНИКОВ ШУМА ГРУППОЙ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ АНПА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк

В задачах, связанных с поисковыми и наблюдательными миссиями, все чаще применяются морские беспилотные комплексы. Охрана акваторий, обследовательские и инспекционные операции, отслеживание морских животных – примеры подобных миссий. При использовании группы взаимодействующих морских беспилотников большая часть таких задач может быть решена более эффективно по сравнению с одиночными аппаратами. В статье рассмотрена задача пассивного обнаружения и локализации посторонних объектов в заданной акватории с указанным размером контролируемой области посредством использования группы автономных необитаемых подводных аппаратов /АНПА/. Предполагается, что на борту АНПА установлены антенны скалярно-векторных приемников для обнаружения и определения направления на источник шума. Рассмотрены некоторые способы организации групповой работы таких АНПА. Исследован централизованный вариант, когда собранная текущая информация от всех АНПА передается в один АНПА-лидер, который на основе обработки полученной информации формирует план работы группы, включающий параметры движения всех АНПА, для обнаружения и определения местоположения источников шума. Рассмотрен подход на основе использования генетического алгоритма, исследованы несколько вариантов его реализации. Приведены результаты модельных экспериментов, которые демонстрируют работоспособность предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: групповая работа, генетический алгоритм, автономный необитаемый подводный аппарат, обнаружение посторонних объектов.

1. Введение

Направлению исследований, связанному с охраной водных акваторий и расположенных в них объектов, уделяется все больше внимания в международном научно-техническом сообществе, о чем свидетельствует увеличивающееся количество статей в рейтинговых научных журналах и докладов на научных международных конференциях.

Традиционные системы подводного наблюдения включают стационарные наборы сенсоров или дорогие и требующие продолжительного времени для развертывания комплексы, основанные на использовании судов. В последнее время для решения задач охраны водных акваторий шире стали применяться морские робототехнические комплексы /МРК/ [1, 2]. Это связано с их возрастающей эффективностью и значительно меньшей стоимостью по сравнению с обитаемыми объектами и судами.

МРК оснащаются системами навигации, связи и сенсорными устройствами, обеспечивающими на за-

данных расстояниях обнаружение посторонних объектов. Продолжительность работы таких МРК может составлять от десятков часов до нескольких суток. Современные МРК способны решать в реальном времени задачи распознавания сигналов, они оснащены системами связи для оперативной передачи текущей информации в центр управления. Применение систем, созданных на основе мобильных роботизированных комплексов, позволяет формировать распределенные в пространстве сети интеллектуальных сенсоров, способные более эффективно и с существенно меньшими затратами решать поставленную задачу.

Наиболее сложная проблема при охране водных акваторий связана с обнаружением посторонних мобильных объектов (морские обитатели, подводные аппараты, пловцы или подводные лодки). Актуальной в настоящее время является проблема обнаружения таких малозумных источников, как подводные беспилотники, которые представляют реальную угрозу судам и объектам морской инфраструктуры.

Основными системами для обнаружения подводных объектов на средних и дальних дистанциях являются гидролокационные системы, принцип действия которых основан на измерении уровня гидроакустического сигнала. Различают пассивные гидролокационные системы, которые измеряют собственные шумы объектов, и активные, которые используют отдельный излучатель и измеряют отраженный от объектов сигнал. В пассивных системах контроля подводной обстановки в настоящее время широкое распространение находят комбинированные скалярно-векторные приемники /СВП/ звука [3, 4]. В [5] описан эксперимент по контролю движения малогабаритного АНПА в мелководной акватории, в котором оснащенные СВП приемные модули были размещены в виде стационарной треугольной измерительной базы со сторонами около 400 м. Максимальная дальность обнаружения АНПА составила около 1000 м.

Проблема охраны водной акватории включает несколько задач. Исходной задачей является организация патрулирования указанной области таким образом, чтобы с требуемой вероятностью за отведенное время обнаружить посторонние объекты. В случае обнаружения посторонних объектов возникают задачи их локализации и распознавания, а также оперативной передачи полученной информации в центр управления.

В [6] рассмотрена проблема защиты портов, представлены требуемые функции защиты и доступные системы, используемые для каждой соответствующей функции. Обсуждаются упрощенная модель защиты портов и методология оценки ее эффективности. Проанализирован пример решения защиты портов на основе группы АНПА и оценена эффективность предлагаемого решения в отношении нескольких сценариев потенциальных угроз. Для решения задачи перехвата движущейся цели в подводной среде в статье [7] предлагается новый алгоритм с использованием нескольких автономных подводных аппаратов, называемый методом прогнозирующего планирования перехвата. Сначала положение перехвата определяется с помощью отслеживания движения цели, а затем траектория перехвата каждого АНПА в окружающей среде планируется методом потенциального поля.

Для поиска и слежения за целью в неизвестной подводной среде в [8] предлагается интегрированный алгоритм для совместной команды из нескольких автономных подводных аппаратов, объединенных нейронной сетью Glasius, основанной на биоинспекции /GBN/. Исследован подход к управлению каскад-

ным отслеживанием, основанный на биоинспекции, для повышения эффективности поиска и уменьшения ошибок отслеживания. GBN используется для управления командой из нескольких АНПА в поиске каждой цели. Этот интегрированный алгоритм работает с различными ситуациями, такими как поиск статических или динамических целей и отслеживание различных траекторий в подводных условиях с препятствиями. Результаты моделирования показывают, что этот алгоритм обладает высокой эффективностью и адаптивностью.

Одним из популярных для решения данной задачи является теоретико-игровой подход. В [9] предложен протокол координации для систем беспилотных морских аппаратов с целью защиты от угроз. Проблема сначала моделируется в рамках теории игр как потенциальная игра. Затем предлагается расширение существующих алгоритмов обучения для решения проблемы отслеживания возможной движущейся угрозы. Этот подход оценивается в сценариях различной геометрической сложности, таких как открытое море, бухты и гавани. Эффективность подхода оценивается с точки зрения индекса безопасности, который позволяет получить инструмент для определения размера команды. Инструмент обеспечивает минимальное количество морских аппаратов, которые будут использоваться в системе, при условии гарантированного желаемого уровня безопасности и максимальной скорости распространения угрозы. Задача максимизации вероятности обнаружения злоумышленника ставится в [10].

Теоретико-игровые методы, как правило, являются централизованными и вычислительно затратными [11], что ограничивает их применение на борту АНПА. Этим обусловлено использование эвристических подходов для решения возникающих оптимизационных задач. Среди таких подходов могут быть эволюционные оптимизационные методы [12] и методы на основе машинного обучения, а также обучения с подкреплением [13]. Проблема совместного принятия решений несколькими АНПА в условиях ограниченного восприятия и ограниченной коммуникации в миссиях защиты акватории исследована в статье [14]. Используется вычислительная сеть, которая может анализировать сенсорную информацию АНПА и извлекать репрезентативные признаки из полученной информации. Разработана платформа моделирования для обучения и оценки предлагаемых алгоритмов при различных параметрах.

Задача планирования поведения для группы АНПА, используемой для обнаружения посторонних объектов в заданной акватории, рассмотрена в [15].

Исследовано несколько алгоритмов, предназначенных для решения задачи централизованного планирования поведения группы АНПА. Они включают алгоритм Хельда–Карпа для точного (оптимального) решения задачи коммивояжеров и алгоритмы, дающие приближенные решения – на основе модификации аукционного метода для централизованного планирования, жадный алгоритм и алгоритм, использующий генетический метод для решения данной задачи. Отмечено, что в связи с экспоненциальной зависимостью времени работы алгоритма Хельда–Карпа и потребляемой им памяти от количества заданий планирование достаточно больших миссий (более 25 заданий) с его помощью становится трудно реализуемым в режиме реального времени. В этом случае рекомендовано использовать генетический алгоритм, который, не накладывая существенных ограничений на бортовой вычислитель, получает более близкое к оптимальному решение по сравнению с жадным и аукционным методами. В связи с этим в данной работе взят за основу генетический алгоритм [16] и исследованы два варианта его реализации – «быстрый» и «надёжный».

В разделе два работы рассмотрена конфигурация системы и приведена постановка задачи. Исследуемый алгоритм работы системы описан в разделе три. Система моделирования, параметры модельных экспериментов и некоторые результаты рассмотрены в разделе четыре. Наконец, выводы и планируемые дальнейшие исследования в данном направлении приведены в заключении.

2. Проблема динамического мониторинга

Рассмотрим ситуацию, когда для решения задач обнаружения используется группа из M однородных АНПА, которая размещается в указанной акватории с заданным размером контролируемой области D . На борту каждого АНПА установлена антенна СВП для поиска малозумных движущихся подводных объектов. Каждый АНПА может обрабатывать собранную им информацию и решать задачу обнаружения и определения направления на источник шума. Предполагается, что обеспечивается групповая навигация АНПА с требуемой точностью.

Обозначим $r_{\max}$ максимальную дальность работы СВП, на которой обеспечивается решение задачи обнаружения и определения пеленга на источник шума. При обнаружении предполагается, что источник шума находится на отрезке длиной $r_{\max}$, который исходит из точки местоположения АНПА под углом φ (рис. 1) относительно его продольной оси.

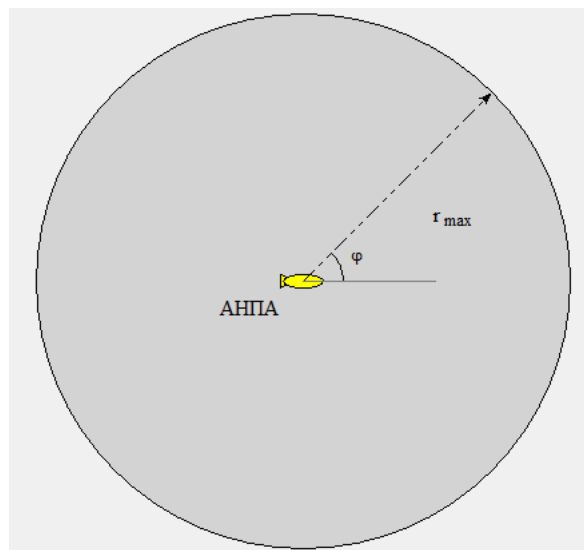
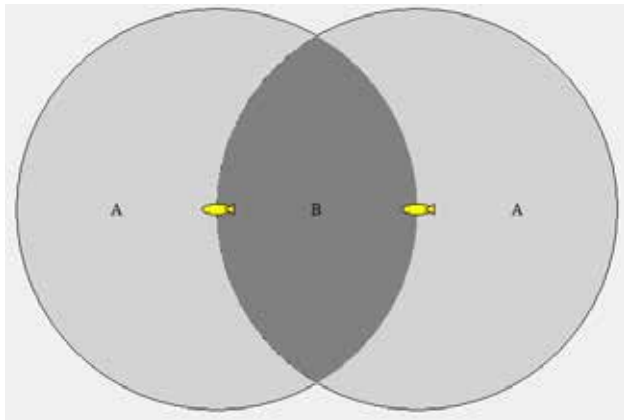


Рис. 1. Источник шума находится на отрезке длиной $r_{\max}$, который исходит из точки местоположения АНПА под углом φ относительно его продольной оси

Положим, что собранная информация от всех АНПА передается в один АНПА-лидер, который на основе ее обработки формирует план поведения всех АНПА из группы для организации совместной работы. При обнаружении одним из АНПА постороннего объекта на очередном такте работы системы лидером формируется новый план для локализации местоположения выявленного объекта с учетом текущего положения всех АНПА. Для локализации выявленного объекта он должен быть обнаружен, по крайней мере, еще одним АНПА. На рис. 2, а и в показаны области локализации (В) постороннего объекта при обнаружении его двумя и тремя АНПА одновременно.

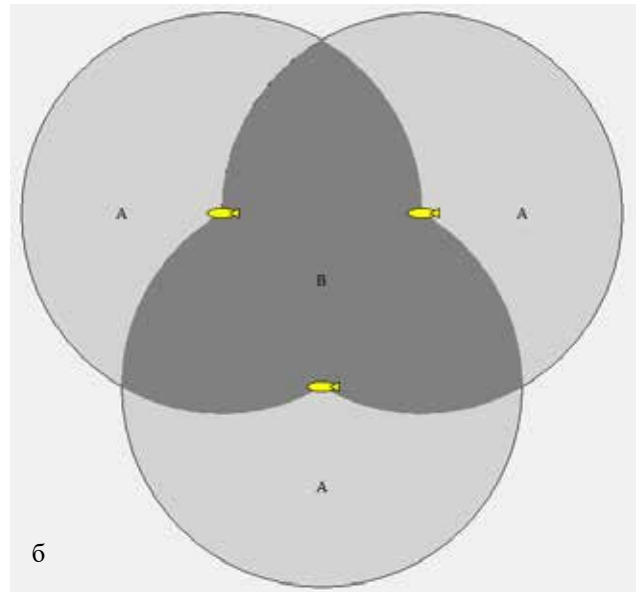
При организации групповой работы для поиска и локализации источника шума /ИШ/ возможны варианты, когда все АНПА движутся поодиночке или когда они синхронно (строем) перемещаются малыми группами из двух или трех АНПА. В случае одиночных АНПА, при обнаружении одним из них ИШ, необходимо спланировать перемещение остальных АНПА к области обнаружения ИШ для скорейшей его локализации (рис. 2, а). Во втором случае, при обнаружении ИШ одним из аппаратов малой группы, остальные АНПА этой группы должны выполнить маневр, обеспечивающий скорейшее попадание обнаруженного объекта в их общую область локализации. Последний подход более затратный в смысле необходимого большего количества АНПА для патрулирования, но обеспечивает более оперативную локализацию обнаруженного объекта.

Постановка задачи. Рассмотрим проблему как задачу динамического мониторинга. Операция мо-



а

Рис. 2. Области обнаружения (А) и обнаружения и локализации (В) постороннего объекта для двух (а) и трех (б) АНПА



б

нитинга сопряжена с определенными затратами с точки зрения потребления энергии, которые примерно пропорциональны пройденному пути каждым аппаратом или времени движения аппаратов. Требуется разработать алгоритм перемещения для всех аппаратов группы, который обеспечит за минимальное время обнаружение и локализацию источников шума, проникших в контролируемую область.

Как указано выше, АНПА-лидер регулярно производит пересчет запланированных траекторий АНПА с учетом их текущего положения, а также количества и размещения обследуемых (обновленных) объектов. Централизованная стратегия накладывает существенное ограничение на время решения задачи планирования траектории для группы АНПА. В связи с этим затруднительна реализация точных алгоритмов получения оптимальных решений, накладывающих высокие требования к бортовым вычислительным ресурсам АНПА. Другими существенными факторами при разработке алгоритма является размер контролируемой зоны, количество АНПА в группе и их начальные местоположения, а также количество и расположение ИШ.

Для скорейшей локализации ИШ, обнаруженного АНПА_р, расположенного на отрезке (АНПА_р, А), необходимо организовать посещение одним АНПА из группы точки с координатами (x_j, y_j) либо точки, симметричной ей относительно отрезка (АНПА_р, А), в зависимости от того, какая из них быстрее достижима (см. рис. 3). Координаты (x_j, y_j) определяются в соответствии с соотношениями:

$$x_j = x_i + r_{\max} \cos(60 - \varphi), \quad y_j = y_i - r_{\max} \sin(60 - \varphi), \quad (1)$$

где (x_i, y_i) – координаты АНПА_р.

В общем случае задача состоит в следующем. Допустим, что имеется m АНПА и n из них обнаружил разные источники шума. Каждый из этих АНПА сохраняет контакт с одним обнаруженным им ИШ. Оставшиеся $m = (m - n)$ аппаратов должны обеспечить локализацию всех n обнаруженных ИШ (выполнить n заданий) за минимальное время (предполагается, что $m > 0$).

Положим, что точка s_q является точкой старта q -го АНПА из состава m аппаратов. Выполнение j -го задания означает посещение точки $X_j = (x_j, y_j)$, полученной в соответствии с (1).

Планом q -го АНПА будем считать набор $p = (X_{q1}, X_{q2}, \dots, X_{qp})$ такой, что $qk \in [1, \dots, n]$ для всех $k = 1, \dots, p$. Выполнение указанного плана начинается с перехода его из точки s_q в точку X_{q1} , затем АНПА переходит в точку X_{q2} и т.д. Выполнение плана заканчивается в точке X_{qp} . Предполагается, что переход между точками пространства от одного задания к другому и от начальной точки выполняется по отрезку прямой (т.е. используется евклидово расстояние). Затраченное время $t(p_q)$ при выполнении АНПА с номером q плана p составляет:

$$t(p_q) = \frac{|X_{q1} - s_q| + \sum_{i=2}^p |X_{qi} - X_{q(i-1)}|}{v_q}, \quad (2)$$

где v_q – скорость движения q -го АНПА.

Общим планом является набор планов $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ такой, что каждое задание встречается среди его планов ровно один раз и ровно в одном варианте. Время выполнения общего плана составляет:

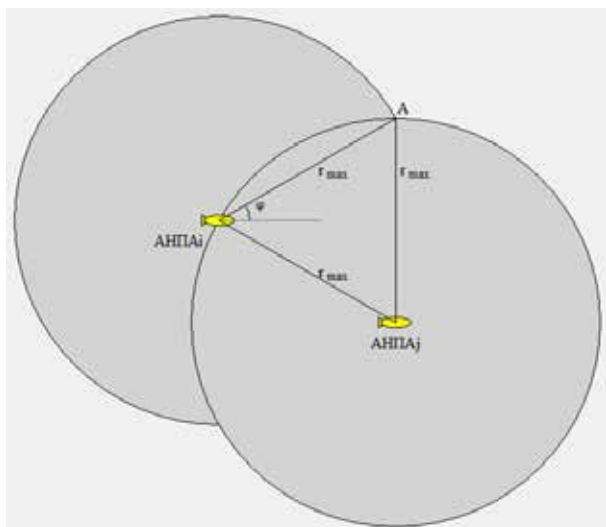


Рис. 3. Локализация ИШ двумя АНПА

$$t(P) = \max_q t(p_q), \quad (3)$$

поскольку миссию можно считать завершённой только после того, как все m АНПА завершили работу. Задача состоит в том, чтобы при заданных начальных положениях АНПА, известном количестве и местоположениях точек посещения найти общий план P , минимизирующий $t(P)$.

3. Описание алгоритма

Общая последовательность действий, применяемых для решения различных прикладных задач с помощью генетических алгоритмов, состоит из следующих основных шагов:

1. Создание начальной популяции (под популяцией в рамках решаемой задачи понимается множество возможных решений (3), образующих множество общих планов P всех аппаратов).
2. Расчет значения функционала качества для каждой особи (в рамках задачи особью является общий план P , т.е. план, регламентирующий последовательность выполнения каждым аппаратом последовательности заданий).
3. Отбор особей для проведения скрещивания.
4. Процедура скрещивания (кроссовер или кроссинговер) и порождения новых потомков (решений, переходящих в новое поколение на следующей итерации алгоритма).
5. Мутация особей (процедура для поддержания разнообразия особей в популяции).
6. Расширение популяции за счет добавления новых решений.

7. Сокращение популяции до исходного размера (с целью ограничения роста использования оперативной памяти).
8. Повторение шагов 2–5 до достижения необходимого значения функционала качества (абсолютное значение которого в реальной ситуации сложно оценить) или до достижения определенного количества шагов (что связано с временными ограничениями на получение решения в реальной ситуации).

Шаги 1, 2 и 8 – достаточно универсальны для большинства реализаций генетических алгоритмов, в то время как последовательность 3–6 имеет свою специфику в зависимости от решаемых задач. Рассмотрим шаги 3–6 подробнее.

Отбор особей для проведения скрещивания. Выбор особей на данном этапе производится на основе значений функционала качества каждой особи, который формируется на основе соотношения (2). Предполагается, что именно «лучшие» особи должны в большей степени подвергаться скрещиванию с целью улучшения популяции на каждой эпохе (итерации) работы генетического алгоритма. Однако стратегии отбора могут варьироваться в зависимости от решаемой задачи. В данной работе рассматривалось две стратегии:

1. «Быстрая» (жадная) стратегия, когда для скрещивания отбирались 10% всей популяции и скрещивание производилось для каждой особи с каждой другой из этого списка дважды (т.к. результат скрещивания случаен за счет случайности пропорций обмена хромосомами – см. шаг 4). В результате скрещивания получается 90% потомков, которые переходят в новое поколение с 10% своих предков. При таком подходе реализуется стратегия элитарности, которая гарантирует отсутствие потери лучшего решения на каждой эпохе алгоритма. Кроме того, размер популяции на шагах 6 и 7 алгоритма при такой стратегии однозначно определен и составляет всегда 100% от начальной популяции.
2. «Медленная» (надежная) стратегия. В данной стратегии для скрещивания отбирались 50% наилучших (с точки зрения функционала качества) особей, которые скрещивались с 50% случайных наилучших особей из этого же списка. Результатом скрещивания при таком подходе является 50% потомков, которые переходят в новое поколение с 50% наилучших особей старого поколения. Шаги 6 и 7 алгоритма при такой стратегии также однозначно определены. Преимущество данного подхода перед

«быстрым» заключается в том, что скрещиванию подвергается большее (50% против 10%) количество особей популяции, что при прочих равных условиях порождает большее разнообразие популяции.

Процедура скрещивания и порождения новых решений. Решением (особью) в рамках рассматриваемой задачи будем называть матрицу R , в которой строкам соответствуют номера АНПА (из группы в составе m аппаратов), а столбцам – координаты ИШ. Таким образом, скрещивание двух особей (матриц) R_1 и R_2 может быть выполнено различными путями. В исследовании рассматривалось несколько вариантов скрещивания двух особей: а) случайный набор первых столбцов от первой особи и оставшиеся столбцы – от второй (скрещивание, наиболее похожее на известный обмен хромосом, но обобщенный на случай двумерной матрицы) и б) обмен случайными ячейками матриц R_1 и R_2 с равной вероятностью. Численные эксперименты показали, что оба рассмотренных варианта обладают схожими показателями сходимости к оптимальному решению при прочих равных условиях.

Мутация особей. Специфика решаемой задачи заключается в поиске наилучшего решения в ограниченный интервал времени на бортовом компьютере АНПА со сравнительно слабым центральным процессором. В этой связи стратегии проведения мутации особей с возможной потерей «хороших» решений не рассматривались. Вместо этого мутация производилась только для особей с одинаковым значением функционала качества. Подобные особи неизбежно появляются с увеличением числа эпох, что связано с нахождением в популяции очень близких «хороших» решений.

Фрагмент разработанного алгоритма представлен в Листинге. Следует отметить, что на данном этапе исследований не преследовалась цель оптимизации алгоритма или разработки исходного кода для встраивания в действующий образец АНПА. В связи с этим, алгоритм был реализован на языке Python и многие оптимизирующие процедуры были пропущены.

Листинг. Основная функция генетического алгоритма поиска ИШ группой АНПА

```
def genetic_algorithm(crossover):
    # Создание начальной популяции.
    solutions = []
    for s in range(SOLUTIONS):
        solutions.append({'robots': [],
                          'profit': 0})
        for r in range(ROBOTS):
```

```
            solutions[s]['robots'].
append([])
            for w in range(WAYS):
                solutions[s]['robots']
[r].append(rnd.randint(0, POINTS-1))
            # Поиск наилучшего решения.
profits_in_epochs = []
            for e in range(EPOCHS):
                sort(solutions)
                mutation(solutions)
                sort(solutions)
                crossover(solutions)
                show(robots, points,
solutions[0])
                profits_in_epochs.
append(solutions[0]['profit'])
            return profits_in_epochs
```

4. Результаты модельных экспериментов

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма проводилась серия численных экспериментов. Работа алгоритма проверялась для ситуаций с одним, двумя и четырьмя АНПА ($m = 1, 2$ и 4). Для определенности выбиралась акватория с двенадцатью искомыми источниками шума, которые расположены очевидным (для анализа результатов) образом.

В данных экспериментах предполагалось, что ИШ неподвижны. Результаты моделирования поиска наикратчайшего пути для одного АНПА при обходе всех ИШ представлены на рис. 4. Рисунки 4, а, б, в отображают рассчитанные траектории АНПА на различных эпохах работы алгоритма. При этом проводилось сравнение работы алгоритмов с «быстрой» и «надежной» стратегиями отбора особей для проведения скрещивания. Можно видеть, что «быстрая» стратегия (рис. 4, z – красный график) приводит к наилучшему решению уже на 10-й эпохе, в то время как «медленная» стратегия достигает аналогичного результата только к 60-й эпохе.

Аналогичное поведение алгоритма можно наблюдать при моделировании работы двух АНПА (рис. 5). Можно видеть, что «быстрая» стратегия также выигрывает у «надежной» без ущерба для качества решения (рис. 5, z , красный и синий графики соответственно).

Иное поведение алгоритма с «быстрой» и «надежной» стратегиями наблюдается при моделировании работы четырех АНПА (рис. 6). Даже при идентичных начальных траекториях в популяции (пример случайной траектории приведен на рис. 6, а) можно наблюдать различные «конечные» состо-

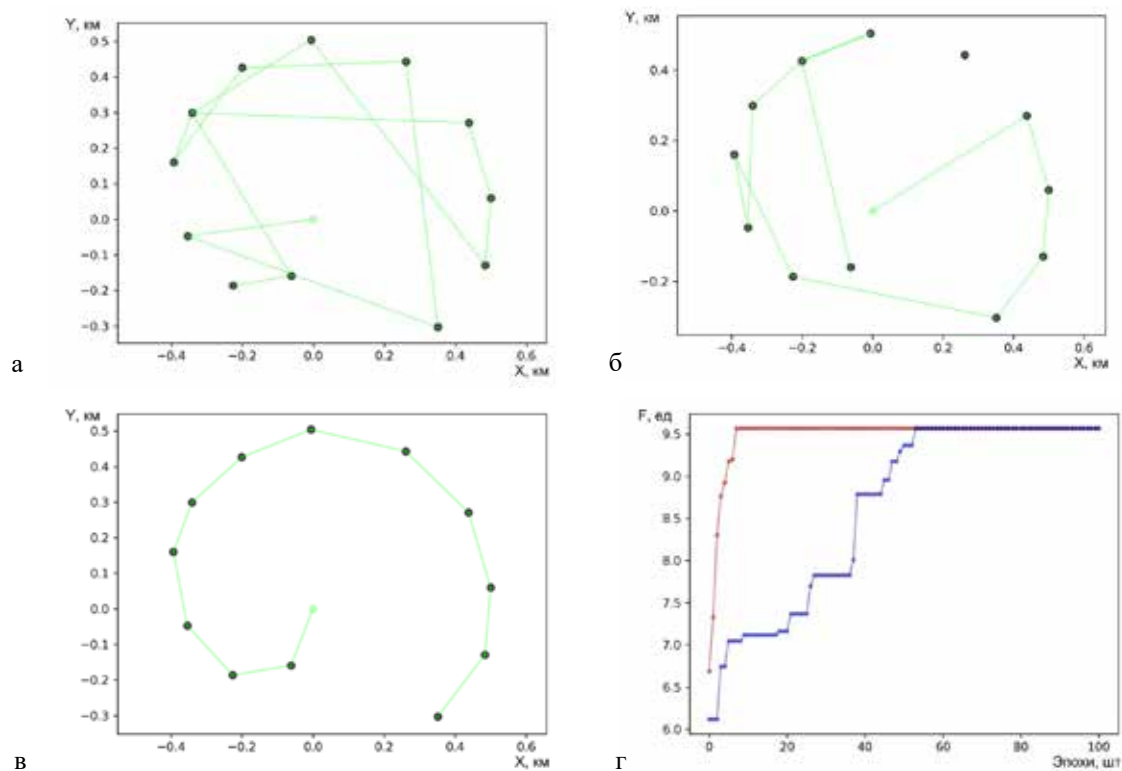


Рис. 4. Работа генетического алгоритма с одним АНПА: а – начальная (случайная) траектория; б – траектория на 40-й эпохе (надежная стратегия); в – траектория на 60-й эпохе и более (надежная стратегия); г – значения функционала качества на каждой эпохе: красная кривая – быстрая стратегия и синяя кривая – надежная стратегия

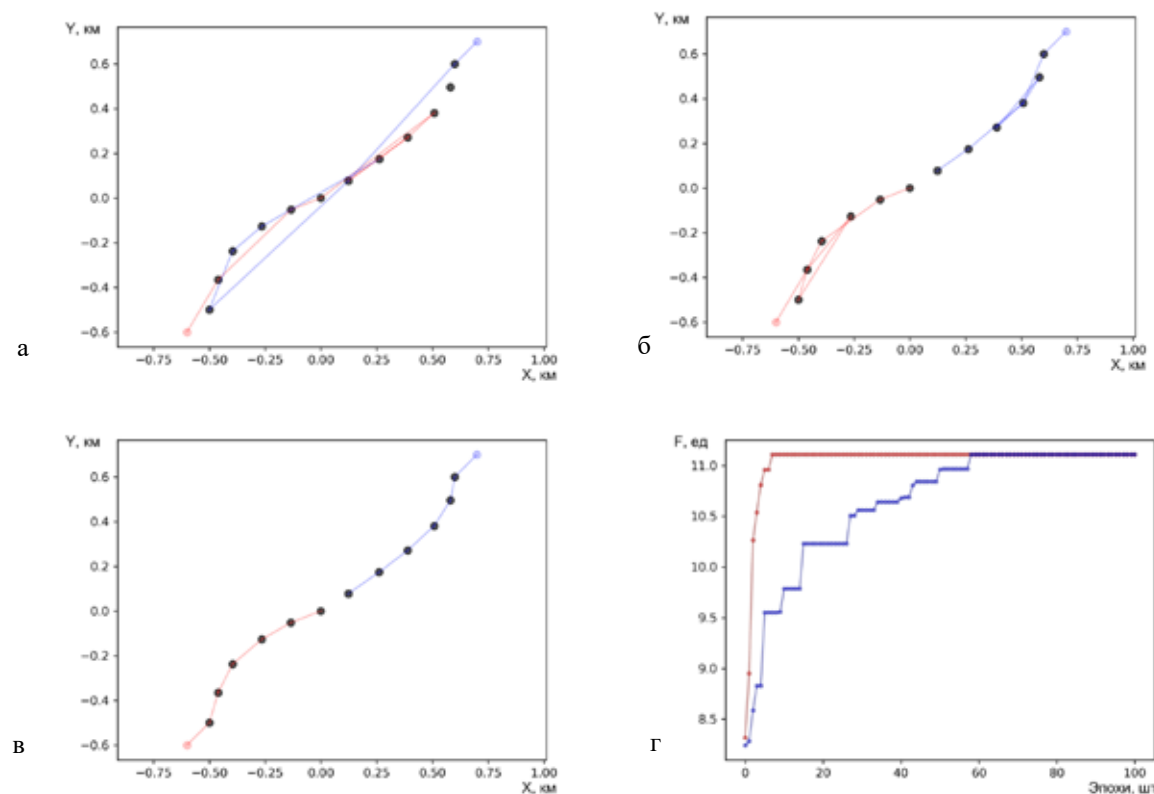


Рис. 5. Работа генетического алгоритма при использовании двух АНПА: а – начальная (случайная) траектория; б – траектория на 40-й эпохе (надежная стратегия); в – траектория на 60-й эпохе и более (надежная стратегия); г – значения функционала качества на каждой эпохе: красная кривая – быстрая стратегия и синяя кривая – надежная стратегия

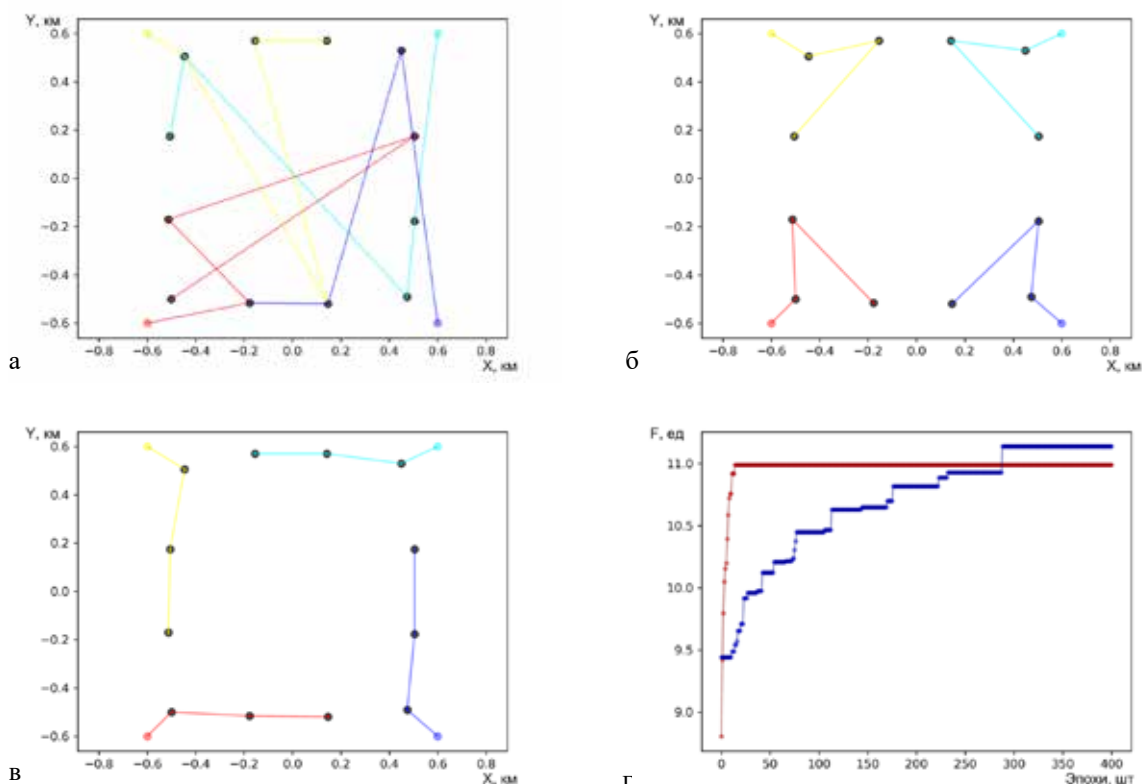


Рис. 6. Работа генетического алгоритма при использовании четырех АНПА: а – начальная (случайная) траектория; б – траектория на 300-й эпохе и более (быстрая стратегия); в – траектория на 300-й эпохе и более (надежная стратегия); г – значения функционала качества на каждой эпохе: красная кривая – быстрая стратегия и синяя кривая – надежная стратегия

яния (не меняющиеся во времени лучшие решения) для различных стратегий. В частности, для алгоритма с «быстрой» стратегией характерны попадание в локальный экстремум с характерной траекторией (рис. 6, б) и отсутствие изменений функционала качества для лучшего найденного решения (рис. 6, г, красный график). В то время как «надежная» стратегия позволяет найти оптимальный путь (рис. 6, в), хоть и проигрывает во времени на ранних эпохах (рис. 6, г, синий график). Подобное поведение объясняется большим охватом разнообразных особей «надежной» стратегией (50% против 10%) при отборе популяции для скрещивания.

Для исследования работоспособности алгоритма и его способности к перепланированию траектории в случае перемещения источников шума в процессе проведения обследования группой АНПА были выполнены эксперименты с тремя АНПА ($m=3$) и 15 источниками шума (рис. 7). Координаты источника шума менялись случайным образом на каждом цикле перепланирования траектории после проведения обследования очередного ИШ. Скорость перемещения ИШ выбиралась случайным образом и находилась в пределах от 0 до $\frac{1}{2}$ скорости аппарата.

Результаты найденного оптимального пути для трех АНПА (красная, зеленая и синяя траектории для каждого аппарата) представлены на рис. 7, а. Начальные координаты ИШ и АНПА задавались случайным образом в пределах выделенной акватории. Расчет оптимального пути производился по описанному выше алгоритму с применением «надежной» стратегии. На рис. 7, б отражена ситуация после проведения обследования каждым аппаратом по одному ИШ. Можно видеть, что в целом планируемые траектории не претерпели существенных изменений, за исключением замены последних точек траекторий второго и третьего АНПА (зеленая и синяя линии с черными точками в конце). На рис. 7, в приведены траектории после обследования двух ИШ. Можно видеть, что в результате накопленного изменения координат ИШ для второго и третьего АНПА существенным образом перепланировали маршруты, которые выстроены примерно параллельно. На рис. 7, г демонстрируется решение, когда аппаратам осталось обследовать по два ИШ на каждую группу.

Количество необходимых итераций алгоритма для приведенного на рис. 7 случая составляет около 180 эпох для 15 искоемых ИШ, 90 эпох – после об-

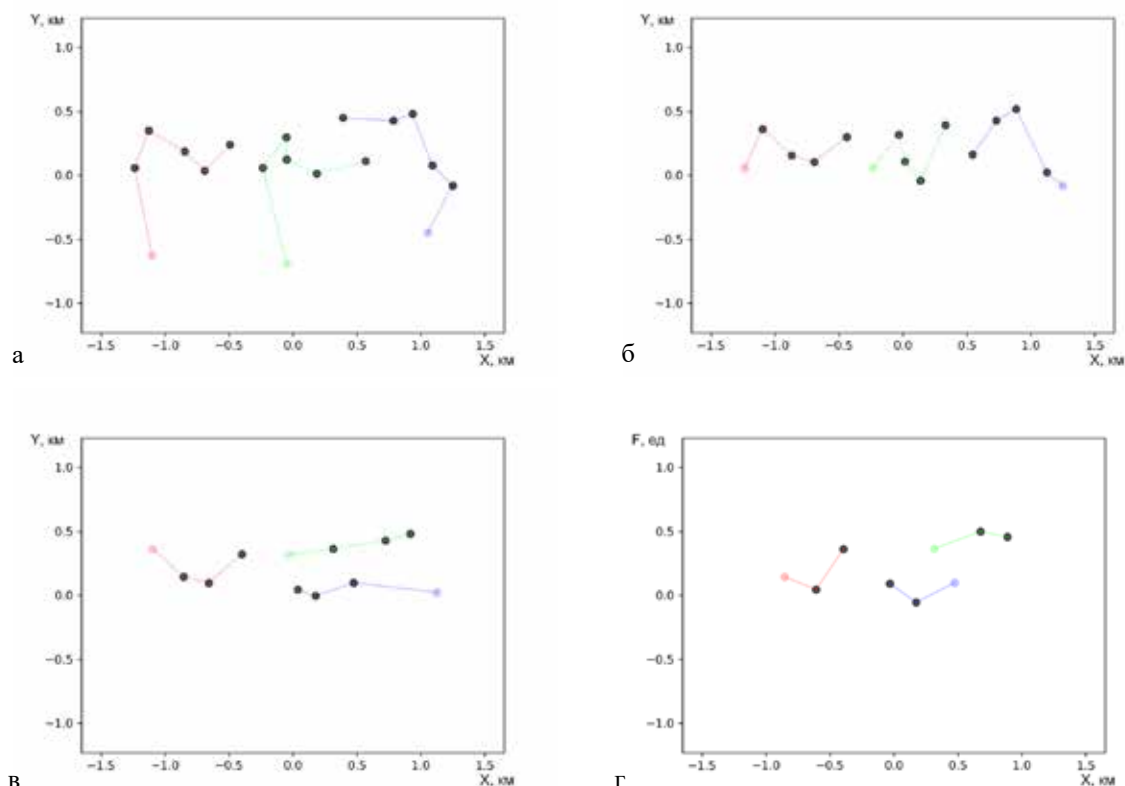


Рис. 7. Работа генетического алгоритма при использовании трех АНПА и 15 движущихся ИШ: а – планируемые траектории АНПА при появлении 15 ИШ; б – планируемые траектории после проведения обследования одного ИШ; в – планируемые траектории после обследования двух ИШ; г – планируемые траектории после обследования трех ИШ

следования одного ИШ каждым аппаратом, 25 эпох – после обследования двух ИШ и менее 5 эпох – после обследования трех. Полученные результаты продемонстрировали работоспособность предложенного алгоритма поиска ИШ группой аппаратов, а малое количество итераций, необходимых для нахождения решений, позволяет сделать выводы о возможности реализации алгоритма на борту АНПА с использованием маломощных энергоэффективных процессоров. В рамках текущего этапа исследований не производилась точная оценка времени нахождения оптимальных планов в зависимости от количества аппаратов и общего количества задач. Подобное исследование предполагается произвести после существенной оптимизации алгоритма и реализации его на языке C++.

5. Заключение

В работе рассмотрена задача обнаружения и локализации источников шума в заданной акватории с использованием группы АНПА, оснащенных скалярно-векторными приемниками. Предложены некоторые способы организации групповой работы АНПА на основе централизованного подхода, когда собран-

ная текущая информация от всех АНПА передается в один АНПА-лидер. На основе обработки полученной информации лидером формируется план работы группы для обнаружения и определения местоположения источников шума. Исследовано несколько вариантов реализации алгоритма на основе генетического подхода, пригодных для реализации на маломощных бортовых вычислителях АНПА. Проведенные модельные эксперименты продемонстрировали эффективность предложенных алгоритмов и позволили определить наиболее подходящие реализации в зависимости от количества АНПА в группе. Дальнейшее направление работ видится в оптимизации предложенных алгоритмов, реализации в качестве составной части системы управления АНПА и проверке работоспособности в реальных условиях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/> (постановка задачи, способы централизованной организации групповой работы с одним АНПА-лидером) и госзадания ИПМТ ДВО РАН (моделирование работы генетического алгоритма).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ferri G., Munafò A., Tesei A., Braca P., Meyer F., Pelekanakis K., Petrocchia R., Alves J., Strode C., LePage K. Cooperative robotic networks for underwater surveillance: an overview // IET Radar, Sonar & Navigation. 2017. P. 40–61.
2. Спорышев М.С., Щербатюк А.Ф. О некоторых алгоритмах решения задачи патрулирования подводной среды с помощью группы взаимодействующих АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4. С. 21–26.
3. Матвиенко Ю.В., Каморный А.В., Хворостов Ю.А. Об одном подходе к решению задачи обнаружения подводного источника шумовых сигналов // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2 (26). С. 37–43.
4. Sullivan E. Bearing Estimation With a Single Moving Pressure-Vector Sensor // Proceedings of the OCEANS MTS/IEEE Conference. Monterey, USA, 2016.
5. Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В., Глушенко М.Ю., Кузькин В.М., Переселков С.А. Экспериментальные исследования системы обнаружения малозумных подводных целей в мелководных акваториях // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 3 (41). С. 4–14.
6. McNelly B., Whitcomb L., Brusseau J., Carr S. Evaluating Integration of Autonomous Underwater Vehicles into Port Protection // Proceedings of the OCEANS MTS/IEEE Conference. Hampton Roads, USA, 2022.
7. Meng X., Sun B., Zhu D. Harbour protection: moving invasion target interception for multi-AUV based on prediction planning interception method // Ocean Engineering. 2021. Vol. 219. P. 1–8.
8. Xiang Cao, Hongbing Sun, Gene Eu Jan. Multi-AUV cooperative target search and tracking in unknown underwater environment. // Ocean Engineering. 2018. Vol. 150. P. 1–11.
9. Nardi S., Santina C.D., Meucci D., Pallottino L. Coordination of unmanned marine vehicles for asymmetric threats protection. Proceedings of the OCEANS MTS/IEEE Conference. Genova, Italy, 2015.
10. Agmon Noa, Sarit Kraus, Gal A. Kaminka. Multi-robot perimeter patrol in adversarial settings // IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. Pasadena, CA, USA, 2008.
11. Asghar A.B., Smith S.L. A Patrolling Game for Adversaries with Limited Observation Time // IEEE Conference on Decision and Control. 2018. P. 3305–3310.
12. Portugal David et al. Finding optimal routes for multi-robot patrolling in generic graphs // IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Illinois, USA, 2014.
13. Adepegba A.A., Miah S., Spinello D. Multi-agent area coverage control using reinforcement learning // The Twenty-Ninth International Flairs Conference. Florida, USA, 2016. P. 368–373.
14. Jian Xu, Fei Huang, Di Wu, Yunfei Cui, Zheping Yan, Kai Zhang. Deep reinforcement learning based multi-AUVs cooperative decision-making for attack–defense confrontation missions // Ocean Engineering. 2021. Vol. 239. P. 1–11.
15. Scherbatyuk A., Sporyshev M. Comparison of Some Algorithms for Centralized Planning of AUV Group Operation for Local Heterogeneities Survey // Proceedings of the OCEANS MTS/IEEE Conference. Shanghai, China, 2016.
16. Melanie M. An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge, Massachusetts; London, England: MIT Press, 1998. 226 p. ISBN 9780262631853.

Сведения об авторах

ПАВИН Александр Михайлович, к.т.н., лаборатория гидрологических систем, ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМТ ДВО РАН)

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А.

Научные интересы: системы управления подводными аппаратами, системы технического зрения, обработка сигнала, искусственный интеллект

Тел.: 8(423)2215545, доб. 510

E-mail: pavin@bk.ru

ORCID: 0000-0001-8878-7888

ЩЕРБАТЮК Александр Федорович, д.т.н., чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, улица Радио, 5

Научные интересы: разработка и использование морских робототехнических комплексов, навигационное обеспечение необитаемых подводных аппаратов

Тел. +7(902)52-38-156

E-mail: alex-scherba@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-7600-6711

Для цитирования:

Павин А.М., Щербатюк А.Ф. О ПОИСКЕ ИСТОЧНИКОВ ШУМА ГРУППОЙ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ АНПА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА // Подводные исследования и робототехника. 2024. № 2 (48). С. 26–37. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_48_02_04. EDN: NLEAQD.



ON THE SEARCH FOR NOISE SOURCES BY A GROUP OF INTERACTING AUVS USING A GENETIC ALGORITHM

A.M. Pavin, A.F. Scherbatyuk

Marine unmanned systems are increasingly used in tasks related to search and observation missions. Protection of water areas, survey and inspection operations, tracking of marine animals are examples of such missions. Most of these tasks can be solved more efficiently by use a group of interacting marine drones, compared to single vehicle. The article considers the problem of passive detection and localization of noise objects in a given water area by use a group of autonomous underwater vehicles (AUV). It is assumed that antennas of scalar vector receivers are installed on board the AUV to detect and determine the direction to the noise source. Some ways of organizing the group work of such AUV are considered. A centralized version is investigated, when the collected current information from all AUV is transmitted to one AUV leader. On the base of received information processing, AUV leader forms a group work plan, including the motion parameters for all AUV, to detect and determine the location of noise sources. An approach based on the use of a genetic algorithm is considered, and several versions of its implementation are investigated. The results of model experiments are presented, which demonstrate the efficiency of the proposed algorithms.

Keywords: group operation, genetic algorithm, autonomous underwater vehicle, detection of foreign objects.

References

1. Ferri G, Munafò A, Tesei A, Braca P, Meyer F, Pelekanakis K, Petrocchia R, Alves J, Strode C, LePage K. Cooperative robotic networks for underwater surveillance: an overview. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2017 Jul 5, P. 40-61.
2. Sporyshev M.S., Scherbatyuk A.F. On some algorithms for solving the problem of patrolling the underwater environment with the help of a group of interacting AUVs. *Underwater Research and Robotics*, No. 4, 2019, pp. 21-26.
3. Matvienko Yu.V., Kamorny A.V., Hvorostov Yu.A. On one approach to solving the problem of detecting an underwater source of noise signals. *Underwater research and robotics*. 2018. No. 2 (26). pp. 37-43.
4. Sullivan E. Bearing Estimation With a Single Moving Pressure-Vector Sensor. *Proceedings of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Conference*, Monterey, USA.
5. Matvienko Yu.V., Hvorostov Yu.A., Kamorny A.V., Glushchenko M.Yu., Kuzkin V.M., Perestrokov S.A. Experimental studies of the detection system for low-noise underwater targets in shallow waters. *Underwater research and robotics*. 2022. No. 3 (41). pp. 4-14.
6. McNelly B., Whitcomb L., Brusseau J., Carr S. Evaluating Integration of Autonomous Underwater Vehicles into Port Protection. *Proceedings of the OCEANS 2022 MTS/IEEE Conference*, Hampton Roads, USA.
7. Xiangqiao Meng, Bing Sun, Daqi Zhu. Harbour protection: moving invasion target interception for multi-AUV based on prediction planning interception method. *Ocean Engineering* 219 (2021). P. 1-8.
8. Xiang Cao, Hongbing Sun, Gene Eu Jan. Multi-AUV cooperative target search and tracking in unknown underwater environment. *Ocean Engineering*, 150, 2018. P. 1-11.
9. Simone Nardi, Cosimo Della Santina, Daniele Meucci, and Lucia Pallottino. Coordination of unmanned marine vehicles for asymmetric threats protection. *Proceedings of the OCEANS 2015 MTS/IEEE Conference*, Genova, Italy.
10. Agmon Noa, Sarit Kraus, Gal A. Kaminka. Multi-robot perimeter patrol in adversarial settings. *2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. Pasadena, CA, USA, 2008.
11. Asghar A.B., Smith S.L. A Patrolling Game for Adversaries with Limited Observation Time. *2018 IEEE Conference on Decision and Control*, 2018. P. 3305-3310.
12. Portugal David et al. Finding optimal routes for multi-robot patrolling in generic graphs. *2014 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. Illinois, USA, 2014.
13. Adepegba A.A., Miah S., Spinello D. Multi-agent area coverage control using reinforcement learning. *The Twenty-Ninth International Flairs Conference*. Florida, USA, 2016. P.368-373.
14. Jian Xu, Fei Huang, Di Wu, Yunfei Cui, Zheping Yan, Kai Zhang. Deep reinforcement learning based multi-AUVs cooperative decision-making for attack-defense confrontation missions. *Ocean Engineering* 239 (2021). P. 1-11.
15. Scherbatyuk A., Sporyshev M. Comparison of Some Algorithms for Centralized Planning of AUV Group Operation for Local Heterogeneities Survey. *Proceedings of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Conference*, Shanghai, China. ISBN: 978-1-4673-7164-3.
16. Melanie Mitchell. *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press, 1998. C. 167. 226 c. ISBN 9780262631853.



Information about the authors

PAVIN Alexander Mikhailovich, Ph.D., leading researcher
Institute of Marine Technology Problems Far East Branch of
RAS

Address: 690091, Vladivostok, Sukhanova str., 5A.

Research interests: underwater vehicle control system, technical vision system, signal processing, artificial intelligence

Phone: 8(423)2215545, plus 510

E-mail: pavin@bk.ru

ORCID: 0000-0001-8878-7888

SCHERBATYUK Alexander Fedorovich, Doctor of Technical
Sciences., corr.-member of RAS, chief scientist
Institute of Automation and Control Processes Far Eastern
Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 5, Radio st., Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: designing and application of marine robotic
systems, positioning of unmanned underwater vehicles

Phone: +7(902)52-38-156

E-mail: alex-scherba@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-7600-6711

Web of Science Researcher ID: K-8737-2017

Scopus Author ID: 6507204366