

УДК 681.883.67.001:621.396.677

# АЛГОРИТМЫ ГРУППОВОЙ РАБОТЫ АНПА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ В ЗАДАННОЙ АКВАТОРИИ

**А.Ф. Щербатюк**

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН*  
Россия, 690041, Владивосток, ул. Радио, 5  
E-mail: alex-scherba@yandex.ru

**А.М. Павин**

*Институт проблем морских технологий ДВО РАН*  
Россия, 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а  
E-mail: pavin@bk.ru

**Ключевые слова:** групповая работа, планирование поведения, автономный необитаемый подводный аппарат, обнаружение посторонних объектов.

**Аннотация:** В докладе рассмотрен подход к решению задачи планирования поведения для группы автономных необитаемых подводных аппаратов /АНПА/, используемых для решения задачи обнаружения посторонних объектов в заданной акватории. При решении рассматриваемой задачи целью является обследование всей заданной акватории для обнаружения посторонних объектов. Рассмотрено несколько алгоритмов, предназначенных для решения задачи централизованного планирования поведения группы АНПА. Они включают алгоритм Хельда-Карпа решения задачи коммивояжера, алгоритм на основе модификации аукционного метода для централизованного планирования, жадный алгоритм и алгоритм, использующий генетический метод для решения данной задачи. Для исследования предложенных алгоритмов было выполнено компьютерное моделирование их работы, некоторые результаты которого приведены в работе.

## 1. Введение

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 заданных 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, а также 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. В последние годы для решения обзорно

поисковых задач все чаще применяются группы АНПА. Это обеспечивает возможность формирования произвольных программных пространственных траекторий на основе текущих измерений. Коллективная работа основана на использовании систем подводной акустической связи, посредством которых АНПА обмениваются результатами измерений.

В течение последнего десятилетия различными организациями прилагаются усилия по разработке более эффективных и надёжных методов решения обзорно-поисковых задач. Работы в данной области объединяются в научные проекты, такие как европейский проект TRIDENT [3]. Важной задачей является организация совместной работы разнородных подводных аппаратов, оснащенных разными системами датчиков. В проекте MORPH [4] исследуется взаимодействие таких аппаратов при обследовании различных сложных объектов. При этом одни подводные аппараты занимаются обнаружением целей, а другие – после получения данных о местоположении объектов занимаются их детальным обследованием. Пример использования двух разнородных АНПА описан в докладе [5]. Один из аппаратов использовался для съёмки батиметрической карты с использованием многолучевого сонара, а другой – для составления фотографической мозаики дна. При этом аппарат, оснащённый фотокамерой, привлекался для съёмки участков дна, которые были выбраны в результате постобработки данных, отснятых первым аппаратом. В статье [6] приведены результаты модельных экспериментов, связанные с исследованием алгоритмов обнаружения и идентификации донных объектов с использованием групп АНПА.

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 возникает задача их локализации и распознавания, а также оперативной передачи полученной информации в центр управления. Наконец, в случае принятия решения о том, что данный объект является нарушителем, необходимо организовать его перехват. Одним из популярных для решения данной задачи является теоретико-игровой подход. В [7] предложен способ координации для систем беспилотных морских аппаратов с целью защиты от угроз.

В работе рассмотрено несколько алгоритмов, предназначенных для решения задачи централизованного планирования поведения группы АНПА. Первый алгоритм основан на методе Хельда-Карпа решения задачи коммивояжера и находит точное решение задачи. Второй алгоритм представляет собой модификацию аукционного метода для централизованного планирования. Третий – жадный алгоритм выбирает, какому аппарату, в какое место в плане вставить задание. Далее план аппарата переупорядочивается с помощью метода динамического программирования, который позволяет найти план для данного аппарата. Четвёртый алгоритм использует генетический метод для решения данной задачи. Для исследования предложенных алгоритмов было выполнено компьютерное моделирование их работы. При этом для расчета перемещения АНПА использовалась кинематическая модель с ограниченными линейной и угловыми скоростями.

## **2. Задача и алгоритмы планирования групповой работы АНПА**

В общем случае под планированием понимается процесс выработки последовательности действий, позволяющий выполнить поставленную задачу. В случае планирования действий группировки роботов этот процесс состоит из нескольких частей. При этом необходимо произвести декомпозицию задачи, разбив её на задания.

Затем следует выработать последовательность выполнения заданий для каждого робота. Среди всех планов требуется выбрать тот, который минимизирует некоторый функционал (например, суммарный пробег всех АНПА).

Каждое задание может иметь разные варианты его выполнения, из которых необходимо выбрать единственный. Варианты задания характеризуются точкой начала его выполнения, точкой конца и временем выполнения. Планом аппарата является упорядоченный набор заданий, выбранных в одном из вариантов, которые данный аппарат должен последовательно выполнить. Наконец, следует осуществлять контроль над выполнением плана и его корректировку в случае возникновения непредвиденных ситуаций, связанных с изменением числа аппаратов в группе или по другим причинам.

При решении рассматриваемой задачи целью является обследование всей заданной акватории для обнаружения посторонних объектов. Одним из вариантов декомпозиции задачи является разделение заданной акватории на области в соответствии с количеством АНПА. Задача составления плана сходна с задачей нескольких коммивояжеров (MTSP), для которой существуют методы получения как точных, так и приближённых решений. Некоторые из них описаны, например, в [8]. Один из рассмотренных в работе алгоритмов, доставляющих точное решение задачи коммивояжеров, представляет собой модификацию алгоритма Хельда-Карпа.

Также рассмотрен алгоритм, который представляет собой модификацию аукционного метода для централизованного планирования. В данном случае все имеющиеся задания упорядочиваются. Каждое очередное задание во всех вариантах выполнения добавляется к уже существующему частичному плану каждого аппарата. Аппарат, имеющий минимальную стоимость частичного плана после вставки нового задания, объявляется выигравшим «аукцион» и задание назначается ему. Таким образом, для каждого задания перебирается:

- аппарат, которому следует назначить задание;
- позиция нового задания в текущем плане аппарата;
- вариант выполнения задания, который следует применить.

Третий – жадный алгоритм выбирает, какому аппарату, в какое место в плане вставить задание. Для каждого возможного места алгоритм вычисляет для всех аппаратов с помощью метода динамического программирования набор вариантов заданий и для всех мест выбирает наилучшее решение.

Наконец, четвертый алгоритм использует генетический метод для решения данной задачи. Генетический алгоритм начинает работу с генерации случайной популяции. Далее выполняется определенное число итераций алгоритма, после чего, независимо от качества полученного решения, алгоритм завершается. Каждая итерация алгоритма работает следующим образом:

- Каждая особь мутирует с заданной вероятностью.
- Согласно заданному проценту, определяется количество погибающих особей.
- Среди всех особей популяции равновероятно выбираются некоторое количество скрещивающихся пар.
- Каждая скрещивающаяся пара производит одну выжившую особь.
- Вычисляется функция приспособленности для каждой особи, после чего определенный процент особей остается в популяции, а остальные заменяются произведенным ранее потомством.
- Из популяции удаляются все особи, являющиеся клонами других. На их место приходят новые, случайно сгенерированные особи.

При работе в реальных условиях возможно возникновение непредвиденных ситуаций. К непредвиденным ситуациям можно отнести более долгое, чем планировалось время выполнения задания или отказ аппаратов. Предполагается, что с

некоторой периодичностью АНПА передают центральному узлу акустический сигнал. Если аппарат не передал сигнал в течение достаточно длительного времени, то предполагается, что он вышел из строя и принимается решение о перепланировании. При этом все ещё невыполненные задания перераспределяются, и новые планы рассылаются аппаратам.

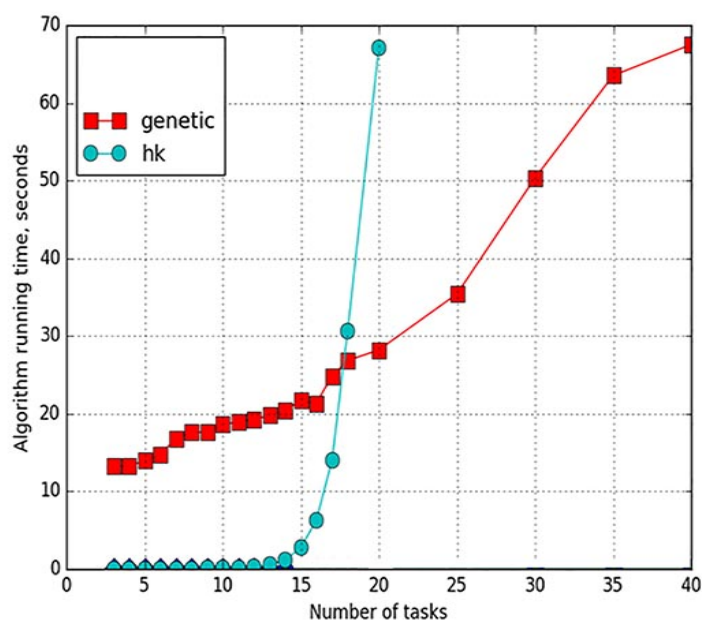
В соответствии с принципом неделимости заданий, при перепланировании следует учесть, что некоторые аппараты могут быть доступны не сразу, а только после завершения их текущих заданий. Это влечёт к определенным модификациям в приведённых выше алгоритмах планирования. В общем случае, центральный узел должен осуществлять постоянный контроль над выполнением плана и, при отклонении от него, выполнять перепланирование.

### 3. Некоторые результаты моделирования

В процессе моделирования было выполнено сравнение эффективности работы указанных выше алгоритмов. Задача состояла в обходе нескольких выделенных на предварительном этапе локальных областей. На вход алгоритмам подавались сгенерированные траектории в виде замкнутых ломаных фрагментов, расположенных в горизонтальной плоскости.

Результаты моделирования показали, что генетический алгоритм почти на всех примерах с небольшим числом заданий выдает решение, не более чем на 2% отличающееся от оптимального, полученного с помощью алгоритма Хельда-Карпа. На примерах с количеством заданий более 25 точность генетического алгоритма начинает падать, однако у жадного и аукционного метода он выигрывает в среднем 15%. Модификация жадного алгоритма с помощью динамического программирования дает выигрыш в среднем на 5% в сравнении с аукционным методом. Стартовые позиции аппаратов генерировались случайным образом.

В связи с более высокой эффективностью для дальнейшего сравнения были оставлены алгоритм Хельда-Карпа и генетический алгоритм. На рис. 1 приведено время расчета плана для алгоритма Хельда-Карпа и генетического алгоритма в зависимости от числа заданий для случая, когда группа содержала три аппарата.



**Рис. 1.** Время расчета оптимального плана для алгоритма Хельда-Карпа и генетического алгоритма в зависимости от общего числа заданий (группа включала три аппарата).

## 4. Выводы

Следует отметить, 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 целесообразно использовать генетический алгоритм, который для таких миссий получает более близкое к оптимальному распределению заданий, по сравнению с жадным и аукционным методами.

В дальнейшем предполагается рассмотреть алгоритмы децентрализованного управления группой аппаратов и сравнить их с рассмотренными в данной статье алгоритмами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-61-10024, <https://rscf.ru/project/23-61-10024/> (постановка задачи, реализация отдельных алгоритмов планирования) и госзадания ИПМТ ДВО РАН (моделирование генетического алгоритма).

## Список литературы

1. Ferri G., Munafò A., Tesesi A., Braca P., Meyer F., Pelekanakis K., Petroccia 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. Спорышев М.С., Щербатюк А.Ф. Об использовании групп морских роботов для охраны водных акваторий: краткий обзор. // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2. С. 21-27.
3. Sanz P.J., Ridao P., Oliver G., Casalino G., Petillot Y., Silvestre C., Melchiorri C., Turetta A. TRIDENT An European Project Targeted to Increase the Autonomy Levels for Underwater Intervention Missions // Proceedings of the OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference. 2013, San Diego, USA.
4. Kalwal J., Carreiro-Silva M., Fontes J., Brignone L., Ridao P., Birk A., Glotzbach T., Caccia M., Alves J., Pascoal A.. The MORPH Project: Actual Results // Proceedings of the OCEANS 2015 MTS/IEEE Conference. Genova, Italy, 2015.
5. Woolsey M., Diercks A.-R., Jarnagin R., Asper V. L. Simultaneous Operation of Heterogeneous AUVs // Proceedings of the OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference. San Diego, USA, 2013.
6. Inzartsev A., Pavin A., Panin M., Tolstonogov A., Eliseenko G. Detection and Inspection of Local Bottom Objects with the Help of a Group of Special-Purpose AUVs // Proc. of the OCEANS 2018 MTS/IEEE Conference. Kobe, Japan, 2018.
7. Simone Nardi, Cosimo Della Santina, Daniele Meucci, Lucia Pallottino. Coordination of unmanned marine vehicles for asymmetric threats protection // Proceedings of the OCEANS 2015 MTS/IEEE Conference. Genova, Italy, 2015.
8. Tuphanov I.E., Scherbatyuk A.F. A centralized planner considering task spatial configuration for a group of marine vehicles: field test results // Proceedings of the IROS 2015 IEEE/RSJ Conference, September 28-October 03, 2015. Hamburg, Germany.