

УДК 551.46.077:629.584

СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППИРОВКОЙ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Л.В. Киселев, А.В. Инзарцев

И.В. Бычков, Н.Н. Максимкин,
А.Е. Хмельнов, М.Ю. Кензин

Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Институт динамики систем и теории управления
СО РАН²

Рассматриваются различные подходы к решению задачи управления группировкой автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), выполняющих коллективные целенаправленные действия в определенной области подводного пространства. Речь идет о возможных стратегиях поведения группы АНПА и выборе оптимальных маршрутов в условиях неполной информации о внешней среде. Как пример рассматривается задача распределения целей для группы АНПА и нахождения их маршрутов при частично известном рельефе дна. Учитываются ограничения на энергоресурсы и необходимость обеспечения регулярной связи между аппаратами. Задача решается на взвешенном графе, в котором вес дуг соответствует энергетическим затратам на переход между двумя целями, а вес вершин – приоритетность целей. Для распределения целей между АНПА используется генетический алгоритм, который выбирает порядок обхода целей по заданной целевой функции. Хромосома в данном случае представляет собой совокупность маршрутов всех аппаратов в группе. Осуществлена программная реализация данного подхода, проведены тестовые расчеты.

ВВЕДЕНИЕ

Расширение масштабов океанографических исследований и прикладных подводных работ различного назначения приводит к необходимости создания автоматизированных распределенных систем взаимодействующих между собой неподвижных и движущихся платформ во всем изменчивом многообразии подводной среды. Подобные автономные сети океанологических измерений (АСОИ) способны обеспечить эффективный мониторинг значительных районов океана, а также производить измерения в заданной акватории с высоким разрешением как по времени, так и в пространстве [1-4].

Значение АСОИ существенно возрастает, если обеспечить связь между измерительными платформами, в качестве кото-

рых наиболее эффективно использовать автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). Координация взаимодействия АНПА требуется при осуществлении измерений в районе того или иного океанского процесса.

В настоящее время технологии, необходимые для развития систем АСОИ, быстро развиваются, и уже имеется опыт организации совместной работы группы АНПА. Группы АНПА можно рассматривать как частный случай так называемых мультиагентных систем (МАС). Вместе с тем при изучении групп АНПА необходимо учитывать, что аппараты в таких системах действуют в реальной подводной среде, для которой характерны априорная неопределенность внешних условий и неточность информации, получаемой от измерительных устройств. Мето-

ды и подходы, используемые в группах автономных динамических объектов, довольно успешно применяются в управлении космическими, летательными, мобильными и другими аппаратами [5-6].

Примером таких исследований может служить проект “Martha”, работы по которому ведутся в Лаборатории анализа системных архитектур Франции [7]. Целью проекта является организация группового взаимодействия нескольких десятков роботов, предназначенных для транспортировки грузов в складских помещениях. Система управления группой роботов состоит из двух частей: центральной станции (ЦС) и

¹ 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./ факс: (4232)432416, e-mail: imtp@marine.febras

² 664033, Иркутск, Лермонтова, 134, тел.: (3952) 427100, факс.: (3952)511616, e-mail: idstu@icc.ru

бортовых вычислителей. Центральная станция стационарна и решает задачу планирования действий всей группы роботов, а также при необходимости обеспечивает связь человека-оператора с каждым роботом группы. Бортовой вычислитель каждого робота предназначен для задачи маршрутизации его движения к указанной цели.

Во время функционирования системы ЦС получает от каждого транспортного робота информацию о его состоянии (координаты, тип перевозимого груза и т.п.). На основе полученной информации от каждого робота ЦС строит карту внешней среды, представляющую собой графовую структуру, вершинами которой являются участки среды, а дугами – пути перехода из одного участка в другой. В ней выделяются вершины, соответствующие текущему положению роботов. На основе карты среды и правил, заложенных в систему, ЦС формирует глобальный план действий всей группы в виде графа, в котором для каждого робота есть собственный подграф. Информация о подграфах (т.е. план действий) передается по каналам связи на все роботы группы, и они эти планы реализуют. Во время движения каждым роботом решается задача маршрутизации для обхода встречаемых локальных препятствий. При этом для решения данной задачи некоторые бортовые вычислители могут обмениваться между собой информацией без участия ЦС.

Другим примером может служить проект “AMADEUS”, предложенный японскими разработчиками [8]. Целью данного проекта является создание группы роботов, обеспечивающих подвоз и вывоз изделий для конвейерных линий. В проекте используются два типа роботов: транспортный робот (ТР), выполняющий непосредствен-

ную перевозку изделий, и стационарный погрузочный робот (СПР), расположенный в непосредственной близости от конвейерной линии и выполняющий погрузочно-разгрузочные работы на конвейере. Основным отличием проекта “AMADEUS” от проекта “Martha” является то, что планировщиком действий для транспортных роботов выступают сразу несколько погрузочных роботов, каждый из которых выбирает из всего множества транспортных роботов (по некоторым признакам) нужный ему и формирует ему необходимое задание для выполнения некоторого действия.

Проблеме группового взаимодействия роботов, функционирующих в неопределенных, плохо структурированных средах, посвящен ряд исследований, проводимых в Японии и США. В университете г. Нагоя разработана система DARS (Distributed Autonomous Robotic System), с помощью которой отрабатываются алгоритмы и методы планирования и управления скоординированными действиями группы роботов [9]. В США в Пенсильванском университете разрабатываются методы управления движением группы мобильных роботов на основе локальной сенсорной информации в режиме “ведущий-ведомый”. Система включает один ведущий робот и несколько ведомых [10]. Управление DARPA финансирует разработку тактических мобильных микророботов для группового применения в городских условиях. Система управления позволяет управлять десятью роботами из единого командного центра. Оператор задает цель для каждого робота, а роботы перемещаются к целям автономно.

В области подводной робототехники подобные работы ведутся в AUSI (Autonomous Undersea Systems Institute, США).

Прорабатывается групповая работа нескольких АНПА, оснащенных солнечными батареями. Концепция коллективной работы состоит в том, что часть аппаратов группировки находится на поверхности и заряжается, а другие в это время выполняют задание под водой. При этом находящиеся на поверхности аппараты образуют навигационную базу для находящихся под водой и одновременно используются для ретрансляции под воду команд оператора, получаемых через спутниковую связь. «Верхние» и «нижние» аппараты постоянно меняются ролями, т.е. зарядившиеся на поверхности аппараты начинают выполнять подводную часть миссии, а работавшие под водой всплывают на поверхность для зарядки [11]. В основу работы положены идеи, реализованные в совместном проекте “САНПА” ИПМТ ДВО РАН и AUSI [12-15].

Показательным примером групповых действий коллектива разнородных роботов является организация противоминной защиты акваторий, концепция которой разработана в рамках программы Office of Naval Research’s (ONR) Very Shallow Water /Surf Zone Mine Countermeasure (VSW/SZMCM) [19]. Группировка включает патрульные АНПА, предназначенные для предварительного обнаружения миноподобных объектов на основе анализа в реальном времени получаемых гидролокационных изображений. Информация об обнаруженных «подозрительных» объектах по акустическим каналам связи передается другим членам группировки (включая гусеничные средства, находящиеся на дне), которые оснащены сонарами высокого разрешения или фотосистемами для организации детального обследования обнаруженных объектов.

Значительный практический интерес представляет организация коллективного управления АНПА при выполнении обзорно-поисковых и обследовательских работ, патрулировании и инспекции подводных объектов и сооружений, оперативном мониторинге водных акваторий и рельефа дна [3].

1. Особенности формирования группового поведения АНПА

При групповой работе аппаратов, выполняющих коллективную задачу, возможны два варианта организации группировки:

- группировка выполняет задачу “вахтовым” методом в неизменном составе;
- в обследуемом районе создается постоянно действующая группировка с переменным (обновляемым) составом.

Организация движения группировки при выполнении коллективной миссии зависит от характера задачи и может осуществляться комбинацией жестких и корректируемых программ с использованием возможностей супервизорного управления.

Характерной задачей является патрулирование водной акватории группой АНПА. Группировка (возможно, с переменным составом) должна обеспечить гарантированный периодический осмотр каждого участка акватории. При этом период осмотра для различных участков может быть неодинаковым. Движение группировки может осуществляться сетью траекторий (галсов) с покрытием заданной площади, строим или произвольным построением с выполнением сплошного или избирательного гидролокационного (профилографического, фототелевизионного и др.)

обзора. Все маневры группировки должны быть скоординированы программно или путем подачи синхронизированных команд. При изменении состава группировки (выводе из состава группировки части аппаратов или добавлении новых) должна быть предусмотрена возможность автоматического перепланирования миссии и синхронизации работы членов получившейся новой группировки с тем, чтобы продолжить выполнение миссии.

АНПА должны иметь возможность обнаруживать как изменение подводной обстановки (по сравнению с ранее полученными данными), так и объекты с заданными характеристиками (осуществлять распознавание). Должны быть разработаны принципы обнаружения (расознавания) заданных объектов на основе информации от поисковых систем технического зрения («интеллектуальный поиск»). В частности, при обнаружении нового объекта его детальное обследование проводится одним из членов группировки либо отдельным АНПА «по вызову».

Одним из вариантов организации группировки АНПА может служить случай, когда аппараты не имеют связи друг с другом, и каждый из аппаратов выполняет индивидуальное задание. В этом сценарии координация действий группировки выполняется на уровне общего центра управления.

В общем случае задание для группировки (миссия) должно включать в себя следующие элементы:

- описание (конфигурацию) обследуемой акватории, её подробную карту;
- описание группировки (количество используемых аппаратов, характеристики их обзорных систем и т.п.), при этом необходимо учесть, что состав группировки может изменяться во времени;

- описание предмета (предметов) поиска (если производится поиск объектов с заданными характеристиками);
- описание действий группировки при обнаружении искомого объекта (объектов);
- другие данные, необходимые для формализации задачи.

Формализуем перечисленные требования в аналитическом виде с использованием нотации, принятой в [5].

В общем случае результирующее действие группировки аппаратов складывается из действий отдельных членов группировки. Задача планирования действий одиночного аппарата описывается следующим образом. Пусть в среде E функционирует аппарат R , состояние которого описывается вектор-функцией $S(t) = \langle s_1, s_2, \dots, s_m \rangle$, состояние окружающей среды – вектор-функцией $E(t) = \langle e_1, e_2, \dots, e_w \rangle$, а под ситуацией в среде понимается пара $P = \langle S, E \rangle$. Множество различных ситуаций системы «робот-среда» описывается точками $(m+w)$ -мерного пространства $\{P\}$. Аппарат может выполнять некоторые действия, описываемые вектор-функцией $A(t) = \langle a_1, a_2, \dots, a_h \rangle$, с помощью которой он может изменять как своё собственное состояние S , так и состояние среды E . В общем случае эти изменения носят непрерывный характер и определяются системой дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = f(A, S, E) = f(A, P) \\ \frac{dE}{dt} = f^*(A, S, E) = f^*(A, P) \end{cases} \quad (1)$$

При этом множество различных действий, выполняемых АНПА, описываются точками h -мерного пространства $\{A\}$. Кроме того, в пространстве ситуаций $\{P\}$ имеется некоторая система ограничений, описывающая множество запрещенных

(разрешенных) состояний, описываемых системой неравенств вида

$$\alpha(S, E) \leq 0, \quad (2)$$

которой должны удовлетворять допустимые ситуации. Аналогичная система ограничений накладывается на пространство действий робота:

$$\beta(A, S, E) \leq 0. \quad (3)$$

С использованием приведенной нотации задача планирования действий одиночного аппарата заключается в определении такой вектор-функции действий $A(t)$ на интервале времени $[t_0, t_k]$, удовлетворяющей связям (1) и ограничениям (2) и (3), в результате выполнения которой достигается экстремум функционала $Y = F(A, S, E) = F(A, P)$, задающего цель функционирования робота в среде.

Аналогично формулируется задача планирования для группы n аппаратов $R_j (j = \overline{1, n})$, функционирующих в среде E , причем состояние каждого члена группы описывается вектор-функцией $S_j(t) = \langle s_{1j}, s_{2j}, \dots, s_{mj} \rangle$. Под ситуацией «роботы-среда» понимается вектор $P_g(t) = \langle S_1, S_2, \dots, S_n, E \rangle$. В общем случае изменения среды в результате действий роботов определяются системой уравнений S :

$$\begin{cases} \frac{dS_j}{dt} = f_j(S_1, S_2, \dots, S_n, A_1, A_2, \dots, A_n, E), j = \overline{1, n} \\ \frac{dE}{dt} = f^*(S_1, S_2, \dots, S_n, A_1, A_2, \dots, A_n, E). \end{cases}$$

Действуют также аналогичные ограничения α и β на разрешенные состояния и действия роботов. Тогда планирование действий группы роботов будет заключаться в определении таких вектор-функций действий $A_j(t)$ для каждого робота группы $R_j (j = \overline{1, n})$, удовлетворяющих упомянутым ограничениям, в результате которых достигается экстремум функционала

$$Y = F(A_1, A_2, \dots, A_n, S_1, S_2, \dots, S_n, E) = F(A_1, A_2, \dots, A_n, P_g),$$

задающего цель функционирования группы АНПА. Следует отметить, что размерность данной задачи в n раз больше размерности планирования действий одиночного аппарата.

Поскольку в среде действуют не зависящие от роботов силы и вектор-функции $S_j(t)$, $E(t)$ могут изменяться непредсказуемым образом, то планирование действий целесообразно осуществлять по принципу обратных связей, когда в текущий момент времени t_0 определяются только текущие действия $A_j^0 (j = \overline{1, n})$ роботов группы, направленные на оптимальное достижение групповой цели из текущей ситуации. После отработки выбранных действий процедура перепланирования повторяется заново. При реализации такого подхода решение задачи планирования текущих действий роботов группы должно осуществляться за время, существенно меньшее времени изменения состояний роботов и среды.

Архитектуры систем группового управления роботами

Всё разнообразие используемых в настоящее время архитектур группового управления подвижными объектами (роботами) можно свести к двум основным:

1) объекты управления взаимодействуют с центральным сервером (ЦС), сообщая ему свое состояние и получая скорректированные планы действий (рис. 1,а). На основе получаемой информации ЦС разрабатывает план действий для каждого объекта, обеспечивающий достижение глобального экстремума функционала $Y = F(A, P)$;

2) ЦС отсутствует, объекты управления действуют самостоятельно, обмениваясь информацией для достижения общей цели (рис. 1,б). Процедура оптимизации функционала $Y = F(A, P)$ в этом случае осуществляется итерационно. В каждом $(k+1)$ цикле $(k=0, 1, 2, \dots)$ на блок приёма информации объекта $R_j (j = \overline{1, n})$ (см. рис. 2) поступает информация о текущих действиях $A_1^{k+1}, A_2^{k+1}, \dots, A_{j-1}^{k+1}, A_{j+1}^k, \dots, A_n^k$, выбранных к данному моменту всеми остальными членами коллектива, а также информация об их текущих состояниях $S_1^0, S_2^0, \dots, S_{j-1}^0, S_{j+1}^0, \dots, S_n^0$. На основании этой информации, а также с использованием знания S_j^0, E^0 вычисляется значение ΔY_j^{k+1} для всевозможных действий данного объекта в текущей ситуации. В качестве действия A_j^{k+1} выбирается такое, для которого значение ΔY_j^{k+1} экстремально. Информация о выбранном действии передаётся на остальные объекты коллектива. Процесс продолжается до тех пор, пока значения функционала $Y = F(A, P)$ не перестают изменяться.

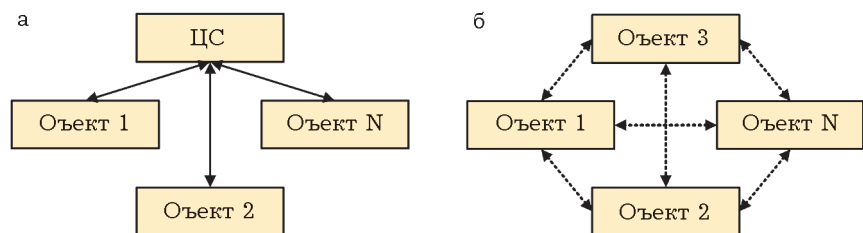


Рис. 1. Варианты структур системы группового управления

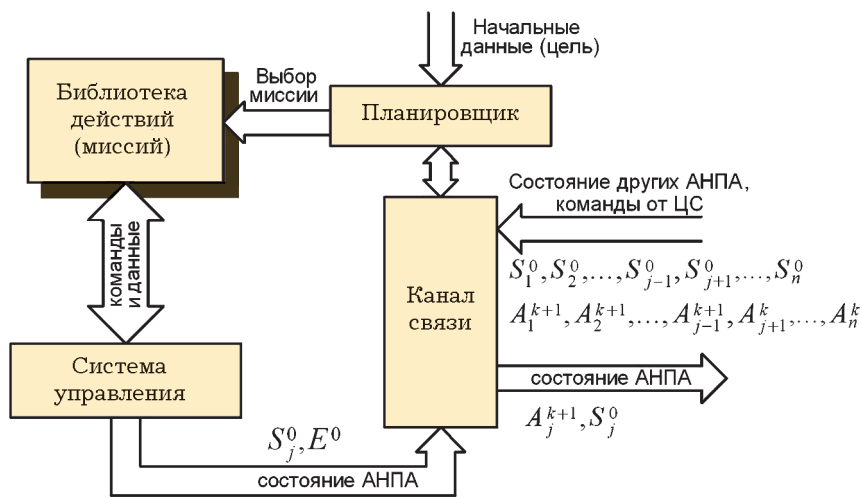


Рис.2. Структура бортовой системы управления робота

Несмотря на разнообразие систем группового управления объектами применительно к АНПА их структуру можно представить в общем виде, показанном на рис. 2.

Изображённые на рисунке блоки играют следующую роль. «Планировщик» на основании информации $A_1^{k+1}, A_2^{k+1}, \dots, A_{j-1}^{k+1}, A_{j+1}^k, \dots, A_n^k$ и $S_1^0, S_2^0, \dots, S_{j-1}^0, S_{j+1}^0, \dots, S_n^0$, поступающей через «Канал связи» от остальных роботов группировки на каждом цикле управления осуществляет минимизацию функционала ΔY_j^{k+1} . Минимизация осуществляется путем выбора наиболее подходящего действия (или миссии) из типовой «Библиотеки действий (миссий)». Далее выбранное действие реализуется «Системой управления», а состояние робота по «Каналу связи» передаётся остальным роботам группировки.

При этом в зависимости от выбранной архитектуры группировки СУ роботов могут отличаться степенью автономности и требованиями к пропускной способности каналов связи.

У полностью автономного АНПА «Канал связи» как таковой отсутствует. В этом случае работает связка «Библиотека

миссий» - «Система управления», и АНПА выполняет единственную миссию, которая была установлена при запуске.

Для случая архитектуры с ЦС АНПА выполняет миссии, которые выбираются по командам центрального сервера, поступающим через «Канал связи». Поскольку команды могут поступать достаточно редко, то в этом случае требования к пропускной способности канала минимальны, а аппарат функционирует большую часть времени автономно. Каждое действие из «Библиотеки действий» представляет собой практически законченные миссии.

Для архитектуры без ЦС требования к пропускной способности канала в (n-1) раз выше, поскольку постоянно необходимо получать информацию о состоянии всех остальных роботов группировки. «Библиотека действий» содержит набор более элементарных действий, которые, вообще говоря, должны выбираться на каждом цикле управления по результатам минимизации функционала Y_j^{k+1} .

Каждая из приведенных на рис. 1 архитектур обладает различными свойствами, и её применение оптимально и

оправданно для определённого круга задач. Архитектура 1 выдвигает существенные требования к мощности ЦС, поскольку в реальном времени решается многомерная задача планирования. Архитектура также выдвигает высокие требования к надёжности работы ЦС и каналов связи. С другой стороны, наличие ЦС гарантирует оптимальность решения поставленной задачи и достижение глобального экстремума функционала $Y = F(A, P)$. К тому же при необходимости человек-оператор всегда может изменить поставленную задачу. Архитектура 2 наиболее подходит для решения заранее поставленной задачи в неопределённой, плохо структурированной среде, когда отсутствует связь с человеком-оператором. Она более устойчива к изменениям состава группировки и выходу из строя отдельных её элементов. К недостаткам можно отнести «неоптимальность» решения задачи, поскольку каждый из роботов пытается достичь локального максимума функционала, описывающего выигрыш от решения. Также значительно более высокие требования предъявляются к пропускной способности каналов связи. Проблематично также изменение оператором целей группировки.

При применении группировки АНПА в замкнутой акватории, оснащенной средствами навигации и связи, оптимальным представляется использование архитектуры 1 (архитектура с ЦС).

К упомянутой выше задаче патрулирования акватории относится задача оптимального планирования маршрутов движения при большом разнообразии целей и ограничений на движение.

Планирование маршрутов при целенаправленных движениях

При достаточно большом количестве целей возникает задача их распределения между аппаратами группы и нахождения рационального порядка обхода (маршрута) для каждого аппарата при наличии физических ограничений.

Примем следующие предположения:

- множество целей задается их координатами, и каждая цель имеет свой приоритет;
- аппараты в группе идентичны между собой по функциональным возможностям;
- начальный запас энергии у всех аппаратов одинаков;
- имеется связь между аппаратами группы через заданные промежутки времени;
- гидроакустический канал связи действует на ограниченном расстоянии и только в прямой видимости, связь между аппаратами может осуществляться через транзитные АНПА.

В задачу системы управления входит планирование и перепланирование маршрутов (командных стратегий) группы АНПА. Перепланирование требуется при любом существенном изменении во внешней и внутренней среде группы АНПА: изменение приоритетов целей, добавление новых целей и отказ от старых, появление непредвиденных препятствий, выход из строя отдельных АНПА или расширение группы новыми аппаратами. Целесообразно, чтобы перепланирование происходило по итерационным алгоритмам типа *any-time*, обеспечивающим в любой момент остановки вычислений приемлемое решение (наибольший суммарный приоритет и наименьшие энергозатраты).

Множество целей, их приоритеты и энергетические затраты, необходимые на преодо-

ление расстояний между ними, а также точка старта/завершения миссии задают полный взвешенный граф $G = (V, E)$. Вершина v_0 – точка старта/завершения миссии. Пусть общее количество целей равно n , тогда $|V| = n + 1$. Поставим в соответствие каждой вершине v_i графа G неотрицательную величину p_i , выражающую приоритет i -й цели, $p_0 = 0$. Определим строку, задающую общий вид маршрута для группы АНПА на графе G :

$$r = ((r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1l_1}), (r_{21}, r_{22}, \dots, r_{2l_2}), \dots, (r_{k1}, r_{k2}, \dots, r_{kl_k})), \quad (4)$$

где r_{ij} – индекс вершины в графе, соответствующей j -й цели i -го аппарата (любая вершина графа входит в маршрут не более одного раза), k – количество аппаратов в группе, l_i – количество целей в маршруте для i -го аппарата.

Функция оценки эффективности работы группы имеет вид:

$$F(r) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{l_i} p_{r_{ij}}. \quad (5)$$

Введем функцию оценки расстояния (вес дуги) между двумя вершинами графа: $L(v_i, v_j) > 0$. Эта функция характеризует энергозатраты для перехода аппарата между двумя соответствующими целями. Вес дуги представляет собой сумму из энергозатрат, пропорциональных длине пути, энергозатрат на исследование смежных вершин (целей) и др.

Пусть R – множество всех возможных конечных маршрутов. Определим допустимое множество маршрутов, удовлетворяющих условиям задачи:

$$D = \{r \in R : L(v_0, v_{r_{i1}}) + \sum_{j=1}^{l_i-1} L(v_{r_{ij}}, v_{r_{i(j+1)}}) + L(v_{r_{il_i}}, v_0) < g, i = 1 \dots k\},$$

где g – емкость бортовых аккумуляторов отдельного аппарата.

Поставим задачу максимизации эффективности работы группы АНПА:

$$F(r) \rightarrow \max, r \in D.$$

В случае с неограниченным запасом энергии и одним аппаратом поставленная задача сводится к задаче о коммивояжере. Как известно, это NP -трудная задача, решение которой за полиномиальное время в общем случае невозможно. Для поиска рационального решения в таких задачах используются эффективные (сокращающие полный перебор) алгоритмы.

Решение задачи планирования маршрутов движения АНПА на основе генетического алгоритма

В качестве метода решения поставленной задачи был выбран генетический алгоритм (ГА), отвечающий таким требованиям, как применимость метода для решения задач большой комбинаторной сложности, возможность использования накопленной базы знаний для перепланирования в изменившихся условиях, *any-time* структура алгоритма [16]. Так, в работе [17] предложено решение генетическим алгоритмом задачи о коммивояжере для группы АНПА на статическом графе и без ограничений на связь.



Рис. 3. Схема работы генетического алгоритма

Последовательность работы ГА можно представить следующей блок-схемой (рис.3).

В качестве хромосомы в нашем случае выступает строка (4). Оценка приспособленности особи производится следующей целевой функцией, в которой второе слагаемое введено для отбора решений с меньшими энергозатратами среди равных по эффективности:

$$F(r) = \left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{l_k} p_{r_{ij}} \right)^2 + c \sum_{i=1}^k e_i,$$

где c – нормирующий коэффициент, используемый в случае, когда эффективность и энергия являются величинами разных порядков, e_i – остаток энергии аппарата с индексом i .

Начальная популяция генерируется случайным образом с учетом ограничения на энергоемкость аппаратов. Для полученных хромосом производится оценка всей популяции в целом и каждой особи в отдельности, после чего решение проверяется на выполнение условий остановки: это может быть достижение лучшей особи определенного значения, исчерпание числа поколений, отпущенных на эволюцию, или исчерпание временного лимита на работу алгоритма. Если условия остановки не были выполнены, запускается механизм формирования нового поколения. В нем можно выделить три последовательных процедуры:

1. Отбор особей для получения нового поколения.

2. Скрещивание (кроссовер) выбранных особей для создания потомков.

3. Мутация старых особей и включение их в новое поколение.

Выбор особей для операторов кроссовера и мутации осуществляется с помощью так называемого «механизма рулетки»: вероятность выбора каждой особи внутри популяции прямо пропорциональна значению ее приспособленности. Также используется принцип элитизма, при котором лучшая особь популяции в неизменном виде переходит в новую, что гарантирует монотонное возрастание целевой функции (5).

В качестве оператора скрещивания используется классический одноточечный кроссовер. Стоит отметить, что этот оператор эффективно влияет на рост значения целевой функции только при скрещивании близко расположенных маршрутов.

Основную роль в формировании новых поколений выполняет оператор мутации. Помимо стандартного изменения случайного элемента в хромосоме он выполняет четыре дополнительных действия:

- 1) удаление случайного узла из маршрута;
- 2) добавление случайного узла в случайное место в маршруте;
- 3) включение случайного узла из окрестности некоторого случайного узла;
- 4) смена местами двух случайных узлов маршрута.

Одной из проблем при использовании ГА является сходимость решения к локальному экстремуму. В некоторой мере решить данную проблему позволяет так называемый «принцип островов», когда создается несколько независимых популяций, которые лишь изредка обмениваются самыми удачными решениями. Наличие в базе знаний альтернативных вариантов решения увеличивает скорость перепланирования, в то же время приводя к увеличению вычислительных затрат алгоритма.

Учет дополнительного ограничения по связи выводит задачу из чисто графовой постановки. В этом случае предлагается введенный выше граф наложить на карту рельефа дна. Тогда ребра графа будут представлять собой траектории АНПА между целями, маршрут отдельного аппарата в проекции на горизонтальную плоскость – замкнутую ломаную ограниченной длины с вычисленным направлением обхода.

Предположим, что скорость движения аппаратов постоянная и равная для всех АНПА. Это дает возможность рассчитывать их местоположение по ходу выполнения миссии на построенных с помощью ГА маршрутах. Тогда указанное ограничение можно переформулировать следующим образом: через каждый заданный промежуток времени сеть АНПА должна образовывать связный граф с длинами дуг (расстояниями между аппаратами) не большими, чем радиус действия связи R_{cs} .

Генерация допустимого начального поколения производится способом «наращивания траекторий»: сначала случайным образом строится маршрут для первого аппарата, затем в его окрестности радиуса R_{cs} генерируется маршрут для второго аппарата, маршрут для

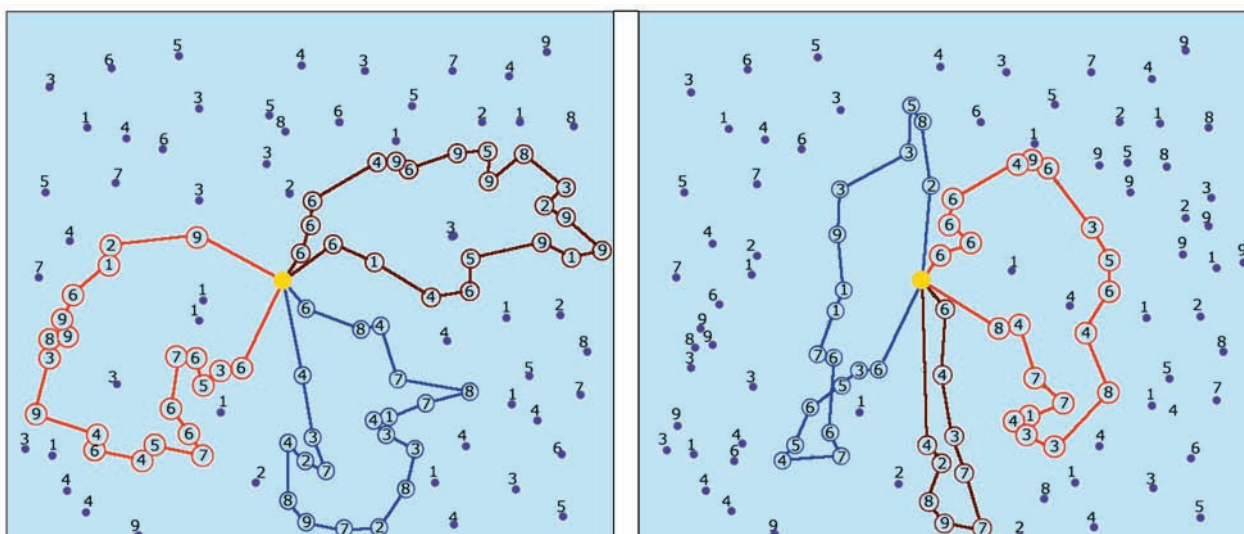


Рис. 4. Маршруты группы АНПА с возвратом в точку старта:
а – без ограничения на связь; б – с ограничениями на связь

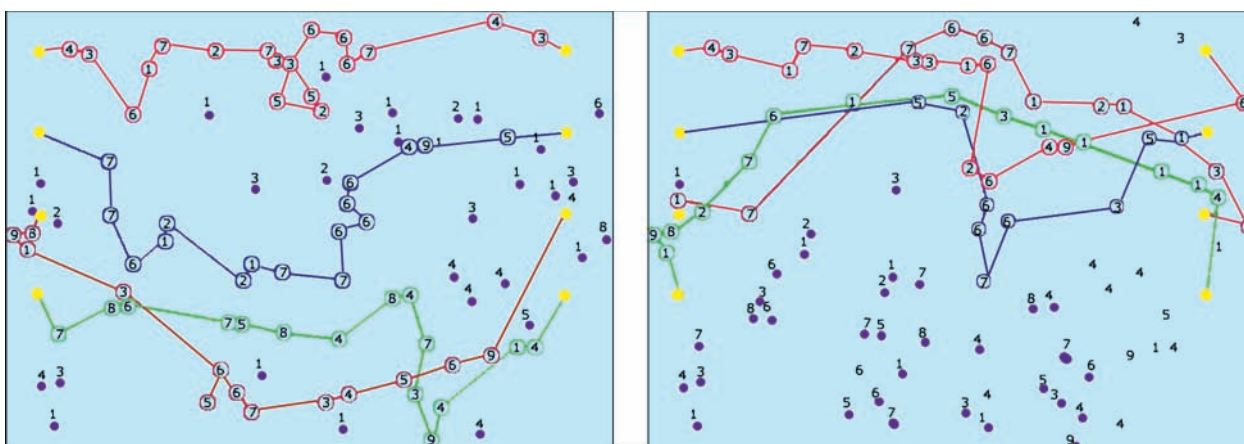


Рис. 5. Маршруты группы АНПА с произвольной точкой финиша:
а – без ограничения на связь; б – с ограничениями на связь

третьего строится уже в объединенной окрестности маршрутов первого и второго и т.д. Предлагаемый подход позволяет решать задачу маршрутизации для группы АНПА при различных начальных и конечных положениях аппаратов. На рис. 4 представлены найденные маршруты, когда группа АНПА начинает и заканчивает свою миссию в одной заданной точке, на рис. 5 показаны маршруты АНПА при перемещении группы из заданного множества начальных положений в заданное множество конечных положений. Числами на рисунках обозначены приоритеты целей.

Модифицированная постановка задачи позволяет также не только сохранять информационное сообщение внутри группы АНПА, но и вводить в модель, например, пространственные запретные зоны, в которых связь нежелательна или физически не может быть установлена из-за препятствий.

Вычисление оценок весов дуг графа

В то же время даже оптимальное решение задачи на графе может оказаться малоэффективным или даже недопустимым, если веса дуг в нем

значительно отличаются от тех энергозатрат, которые на самом деле понесет аппарат при перемещениях между целями. Предполагая, что энергозатраты на движения по траектории прямо пропорциональны ее длине, в дальнейшем речь будет идти о поиске длины пути между роботом и целью при различных режимах движения АНПА.

Очевидно, что имея полные данные о подводном рельефе, вычисление таких расстояний не представляет особой сложности. Однако в неизвестной среде расчет приемлемых оценок является нетривиальной задачей.

Модель рельефа в данном случае представляет сетку высот. Траектория пути между двумя целями имеет вид последовательности узлов сетки, часть которых лежит в неисследованной территории. Необходимо так спрогнозировать рельеф в неизвестных узлах, чтобы длина рассматриваемой траектории представляла приемлемую оценку действительного пути.

Нахождение оценок весов дуг можно разбить на три этапа, позволяющих избежать основных недостатков существующих методов [18]:

- 1) локальный прогноз ландшафта;
- 2) глобальный прогноз (расчет коэффициента коррекции расстояния);
- 3) поиск кратчайшего пути.

Локальный прогноз ландшафта представляет собой в некотором роде экстраполяцию функции, описывающей уже известный рельеф, на несколько шагов вглубь неизвестного рельефа. Это позволяет избежать недооценки размеров тех препятствий, которые лишь частично находятся в исследованной зоне. Локальный прогноз производится поточечно, на основе известных значений из окрестности прогнозируемой точки.

Так как подводный ландшафт сформирован под влиянием множества факторов, точный прогноз его невозможен. Поэтому ставится задача не столько максимально точно спрогнозировать высоту рельефа в узле карты высот, сколько выявить в ее окрестности тенденции к появлению возвышенностей или тенденции к изменению наклона склонов.

После построения пути не составит труда посчитать его длину. Однако возникает проблема оценки длины пути,

проходящего через ту часть неисследованной области, в которой локальный прогноз проведен не был. Очевидно, что использование для этого евклидова расстояния даст приемлемый результат только в том случае, когда в этом районе морское дно является абсолютно плоским. В пересеченной местности длина пути на этом промежутке может превышать евклидово расстояние в два раза и более. Поэтому имеет смысл ввести коэффициент коррекции евклидовой длины. Этот коэффициент зависит от различных параметров уже известного рельефа.

При работе АНПА используются обычно два режима движения: движение вдоль ландшафта, при котором аппарат сохраняет фиксированное расстояние до дна, и движение над ландшафтом, на которое это ограничение не накладывается. Так как траектории маршрутов при этих режимах зависят от различных параметров местности, вполне очевидно, что для расчета их длин нужно использовать два разных коэффициента. В данной процедуре был использован метод нечеткой логики как наиболее подходящий для оценки таких параметров, как "Пересеченность местности", "Размер гор" и т.д.

Поиск траектории пути по уже известной территории и спрогнозированному рельефу производится при помощи алгоритма A^* (a-star, эври-

стический алгоритм поиска оптимального пути на графе). Классический A^* был адаптирован к трехмерной задаче и дополнен возможностью поиска в двух режимах с ограничениями на передвижение аппарата в горизонтальных и вертикальных плоскостях.

Программная реализация и тестовые примеры

Для тестирования, проверки и доработки алгоритмов прогнозирования длины пути был создан симулятор запуска отдельного АНПА при частично известном рельефе дна с необходимыми для обхода контрольными точками. Многократный запуск симулятора с различными параметрами показал среднюю погрешность определения длины траектории в размере 15% от длины реального пути.

Для планирования маршрутов группы АНПА на основе генетических алгоритмов была также разработана программасимулятор, позволяющая искать маршруты, в том числе и при ограничении на связь. Ниже (см. таблицу) приведены результаты тестирования на различных наборах целей и различных длинах хромосом с учетом ограничений на энергию и связь. В примерах использовалось 5 аппаратов, 3 параллельных популяции по 100 особей. Тестирование проводилось на компьютере с

Результаты тестирования генетического алгоритма

Длина хромосомы	Время поиска оптимального маршрута, с								
	Количество целей								
	20	50	80	100	200	300	500	700	1000
20	17	24	25	34	38	46	67	80	85
40	38	50	55	76	84	101	152	176	188
60	57	75	95	114	126	149	228	264	282
80	76	105	117	160	177	212	318	396	395
100	102	136	152	208	232	270	413	518	551

частотой 3 ГГц и 2 Гб оперативной памяти.

Тестирование показало, что результативность предложенного алгоритма маршрутизации существенно зависит от карты расположения целей. Так, наиболее эффективно решаются те типы задач, в которых в сфере радиуса R_{cs} в среднем находится несколько целей. В случае, когда цели между собой находятся на значительном расстоянии (большем, чем радиус связи), решение вообще может не быть найдено. В этом случае добавление новых вершин графа с нулевым приоритетом позволит находить допустимые решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время проблемы организации коллективных действий АНПА перешли из сферы теоретических построений в сферу практических разработок. Имеющийся опыт проведения обзорно-поисковых и обследовательских работ в океане с использованием одиночных АНПА позволяет сформулировать основные требования к группировкам аппаратов и стратегиям их поведения. В рамках ситуационного управления группой аппаратов необходимо решать широкую комплекс задач по выбору сценариев, оценке ситуаций, взаимодействию, планированию маршрутов в

условиях существенных ограничений и неопределенности среды. Представленное в работе решение задачи распределения целей и планирования маршрутов нескольких АНПА учитывает ограничения на параметры движения, энергоресурсы и организацию регулярной связи между аппаратами. Предлагаемый метод характеризуется естественной параллельностью вычислений и может быть модифицирован для решения ряда других задач группового управления.

Работа выполнена при поддержке грантов ДВО РАН, проект № 09-П-СО-03-001, Президиума СО РАН, проект № 45 ИДСТУ СО РАН – ИПМТ ДВО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stommel H. The Slocum Mission // *Oceanography*. 1989. 2(1). P. 22-25.
2. Curtin T., Bellingham J., Catipovic J., Webb D. Autonomous oceanographic sampling networks // *Oceanography*. 1993. Vol. 6, No. 3.
3. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общей ред. М.Д.Агеева. М.: Наука, 2005. 398с.
4. Агеев М.Д. Создание автоматизированной сети океанографических измерений на основе АНПА с солнечной энергетикой // *Подводные исследования и робототехника*. 2006. №2. С. 5-12.
5. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Распределенные системы планирования действий коллективов роботов. М.: Янус-К, 2002. 292с.
6. Earl M. G., D'Andrea R. A Decomposition Approach to Multi-vehicle Cooperative Control // *Robotics and Autonomous Systems*. 2007. Vol. 55, No. 4. P. 276-291.
7. Alami R., Fleury S., Herrb M. et al. Multi-Robot Cooperation in the MARTHA Project // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 1998. Vol. 5, No. 1. P. 36-47.
8. Karada T., Oikawa K. AMADEUS: A Mobile, Autonomous Decentralized Utility System for Indoor Transportation: Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation // *IEEE*. 1998. Vol. 4. P. 2229-2236.
9. Kaga T., Fukuda T. An Oscillation Analysis on Distributed Automations Robotic System: Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation // *IEEE*. 1998. Vol. 4. P. 2846-2851.
10. Desai J.P., Ostrowski J., Kumar V. Controlling Formations of Multiple Mobile Robots: Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation // *IEEE*. 1998. Vol. 4. P. 2864-2869.
11. Chappell G., Komerska J., Blidberg D. et al. Recent Field Experience with Multiple Cooperating Solar-Powered AUVs // *Proc. of the Fifteenth Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology*, August, 2007. Durham, 2007.
12. Jalbert J.C., Irazoqui-Pastor P., Miles S., Blidberg D.R., Darwin J., Ageev M.D. AUV Technology Evaluation and Development Project // *Proc. of the 10th Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology*. Durham, 1997. P. 75-87.
13. Blidberg D.R., Jalbert J.C., Ageev M.D. Experimental Results: The AUSI/IMTP Solar Powered AUV Project // *Proc. of the Ocean Community Conference'98*. Baltimore. Nov. 16-19. Baltimore, 1998.
14. Ageev M.D., Jalbert J.C., Blidberg D.R. Description and Analysis of a Solar Autonomous Underwater Vehicle // *MTS Journal*. Winter 1998-99. Vol. 32, No. 4.
15. Ageev M.D., Blidberg D.R., Jalbert J., Melchin C.J., Troop D.P. Results of the Evaluation and Testing of the Solar Powered AUV and its Subsystems // *Proc. of 11th Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology*, Durham, NH, August 23-25, 1999. Durham, 1999.
16. Holland J. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
17. Wu X., Zeng Z., Zhu J., Allen R. GA-based path planning for multiple AUVs // *Int. Journ. of Control*. 2007. Vol. 80, No. 7. P. 1180-1185.
18. Stentz A. Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments // *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA '94)*. 1994. May. P. 3310-3317.
19. Stokey P., Freitag E., Grund D. A Compact Control Language for AUV Acoustic Communication // *Proc. of Oceans'95, Europe*. http://acomms.who.edu/publications/CCL_Oceans Europe 95-Final.pdf.