

УДК 551.46.007:629.584

# ЭВОЛЮЦИОННЫЕ МОДЕЛИ МАРШРУТИЗАЦИИ ГРУППОВОГО ДВИЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ ПРИ МНОГОЦЕЛЕВОМ ДИНАМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

**И. В. Бычков, М. Ю. Кензин, Н. Н. Максимкин,  
Л. В. Киселёв**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Институт динамики систем и теории управления» СО РАН<sup>1</sup>  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Институт проблем морских технологий» ДВО РАН<sup>2</sup>

Управление группировкой автономных подводных роботов (АПР) представляет как теоретический, так и практический интерес для решения задач, связанных с выполнением обзорно-поисковых и обследовательских работ, патрулированием и инспекцией подводных объектов и сооружений, оперативным мониторингом морских акваторий и рельефа дна. К числу таких задач относятся задачи динамической маршрутизации группового движения в условиях изменяющейся обстановки и целей выполняемых миссий. Для решения данного класса задач используются эволюционные модели, основанные на биологических аналогах (генетических алгоритмах), оперирующих такими понятиями, как приспособляемость, накопление полезных свойств, поиск оптимума некоторой целевой функции. Анализ показывает, что «биологический механизм» во многом аналогичен технологии организации группового процесса в такой специфической системе, как «популяция» подводных аппаратов. Решение задачи маршрутизации строится из нескольких последовательных процедур, включающих планирование групповой многоцелевой миссии АПР с использованием гибридных (генетических) алгоритмов и топологий типа взвешенных графов, оценку эффективности спланированных маршрутов и реализацию маршрутов. Разработан программный моделирующий комплекс, реализующий полный набор всех необходимых вычислительных процедур.

## ВВЕДЕНИЕ

Возросший интерес к вопросам управления группировками автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) – автономных подводных роботов (АПР) обусловлен как расширением масштабов океанографических исследований, так и появлением ряда новых задач, ориентированных на взаимодействие между собой нескольких аппаратов [1, 2]. Характерной задачей является патрулирование морской акватории группой АНПА. Группировка (возможно, с переменным составом) должна обеспечить гарантированный периодический осмотр каждого участка акватории или на-

значенных целей (объектов). При этом период осмотра для различных участков может быть неодинаковым. Движение группировки может осуществляться сетью траекторий (галсов) с покрытием заданной площади, строем или произвольным построением с выполнением сплошного или избирательного 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. Аппараты 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 (распознавания) заданных объектов на основе информации от поисковых систем технического зрения («интеллектуальный поиск»). В частности, при обнаружении нового

<sup>1</sup> 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134.  
Тел.: (395) 2427100. E-mail: idstu@icc.ru

<sup>2</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел/факс: (423) 2432416. E-mail: kiselev@marine.febras.ru

объекта его детальное обследование проводится одним из членов группировки либо отдельным АНПА «по вызову».

Управление при обходе множества целей должно строиться путем планирования и перепланирования маршрутов (командных стратегий) для всей группы. Перепланирование требуется при любых существенных изменениях во внешней и внутренней среде группы. К таковым относятся изменения приоритетов целей, добавление новых целей и отказ от старых, появление непредвиденных препятствий, изменение состава группировки и т.п.

Множество целей, их приоритеты и временные затраты, необходимые на преодоление расстояний между ними, а также точки старта/завершения миссии можно представить в виде взвешенного графа, в котором каждой вершине ставится в соответствие свой приоритет. В общем случае оптимизация маршрутов сводится к поиску допустимого маршрута, обеспечивающего наиболее эффективную работу группы с точки зрения требований к посещению целей, а также временных и/или энергетических затрат. Арсенал математических средств решения подобных задач довольно богат, но если оставаться в рамках реальных условий подводной среды, то выбор несколько сужается. Тем не менее такие особенности задачи, как комбинаторная сложность, необходимость использования накопленной базы данных для перепланирования миссий и некоторые другие, придают привлекательность методам, взятым из других областей знаний [3]. В нашем случае это относится к использованию генетических алгоритмов, удовлетворяющих упомянутым особенностям задачи.

Понятно, что при управлении конфигурацией группы аппаратов

(относительным расположением), а также перемещением группы по предписанным траекториям важно обеспечить устойчивость конфигурации при наличии навигационных и динамических ошибок и ограничений на ресурсы управления. В подобных системах обычно используются конфигурации, в которых участники либо связаны каким-нибудь типовым отношением, либо действуют в зависимости от ситуации. Задача состоит в обеспечении (с определенной точностью) заданных навигационных и динамических параметров, определяющих желаемую конфигурацию группировки. Формальная постановка задачи и метод ее решения на основе вектор-функций Ляпунова даны, например, в работе [2].

Работы, посвященные непосредственно маршрутизации групп АНПА, стали появляться в научной литературе только несколько лет назад [4–8], вследствие чего в настоящее время отсутствует единый подход к организации высокоуровневого группового управления при сложных пространственно-временных ограничениях.

В общем случае задача планирования таких широкомасштабных миссий для группы АНПА представляет собой вариацию задачи комбинаторной оптимизации (ЗКО) и состоит в том, чтобы назначить имеющиеся задания аппаратам группы и определить порядок их выполнения, обеспечивающий максимальную эффективность работы группы при действующих ограничениях. В зависимости от типа исследовательской миссии и дополнительных ограничений, накладываемых на действия группы, задача может также приобретать черты таких разновидностей ЗКО, как маршрутизация с временными окнами, периодическая маршрутизация и др.

Все постановки задач, рассматриваемые в литературе применительно к маршрутизации групп автономных роботов, обладают одной общей отличительной особенностью, идущей от классической постановки задачи маршрутизации: в рамках одного маршрута каждая контрольная точка (цель) должна быть посещена ровно один раз (в лучшем случае, не более одного раза). Такая постановка может использоваться для описания поисковых или обследовательских миссий [6–8], одна она не может быть применена для задач длительного исследования (мониторинга) динамики различных подводных процессов и других многоцелевых миссий, требующих неоднократного посещения и исследования заданного множества контрольных точек.

В данной работе предлагается формализация задачи маршрутизации группы АНПА, выполняющей миссию по регулярному мониторингу акватории, в виде нового класса ЗКО, а также приводится структура разработанного эволюционного подхода для ее эффективного решения.

## 1. Задача планирования групповых миссий АНПА

Многоцелевая миссия группы АНПА по регулярному мониторингу заключается в посещении и исследовании аппаратами группы некоторого множества контрольных точек с заданной периодичностью. Задача планирования такой миссии заключается в поиске таких групповых маршрутов АНПА, которые обеспечивали бы, насколько это возможно, своевременное посещение большинства контрольных точек с учетом ограничений, накладываемых на движение группы.

Планирование групповой многоцелевой миссии АНПА осуществляется:

а) в условиях ограниченной области морского дна (акватории) с заданной картой рельефа;

б) для заданного конечного множества контрольных точек (целей), расположенных в пределах акватории и требующих обследования;

в) группой из нескольких АНПА, состояние каждого из которых описывается рядом параметров;

г) при определенном наборе ограничений, накладываемых на действия как отдельных АНПА, так и всей группы;

д) с учетом оценки эффективности выполнения групповой миссии.

Остановимся подробнее на формализации перечисленных условий выполнения групповой миссии АНПА (табл. 1).

**Область выполнения миссии**, или акватория, представляет собой трехмерное множество пространства  $D = \{(x, y, z) : 0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, \zeta(x, y) \leq z \leq Z\}$ , где функция  $\zeta(x, y)$  возвращает значение высоты рельефа в выбранной точке согласно известной карте высот.

Акватория может содержать набор запретных к посещению областей произвольной формы, но при этом множество  $D$  всегда является связным, что гарантирует возможность посещения АНПА любой точки акватории, не входящей в запретные области.

Множество **целей миссии**  $\Omega$ , расположенных в рамках акватории  $D$ , представляет собой пронумерованное множество из  $N$  точек вида  $(x_i, y_i, z_i) \in D, i = 1, \dots, N$ . В зависимости от типа обследовательских работ, проведение которых требуется в конкретной контрольной точке, соответствующей ей цели присваиваются один из двух типов  $T_i = \{1, 2\}$  и **параметр периодичности**  $p_i$ . В данном случае  $T_i = 1$  означает, что цель  $i$  *нестрого регулярная*, т.е. длительность временного отрезка между двумя ее последовательными посещениями аппаратами группы не должна превышать значения  $p_i$ . Для второго, *строго регулярного* типа целей, значение  $p_i$  задает точную длину требуемого временного периода между посещениями цели  $i$ . Кроме своего типа и координат каждая

цель  $i$  характеризуется временем  $s_i$ , необходимым на проведение в ней всех требуемых обследовательских работ, а также временем  $\Delta\tau_i$ , прошедшим с последнего посещения цели аппаратами группы.

Другими словами, нестрогая регулярная цель должна посещаться АНПА не реже значения своей периодичности. Цели такого типа обычно используются в заданиях патрулирования и охраны, а также проверки целостности различных физических объектов, для которых справедлив принцип «чем чаще, тем лучше». В свою очередь, регулярные цели строгого типа должны по возможности посещаться точно через заданные промежутки времени, поэтому в случае прибытия к объекту исследования раньше назначенного срока АНПА должен ожидать истечения заданного временного периода, прежде чем начать обследование. Такая схема более эффективна в заданиях исследования динамики различных подводных процессов, когда АНПА прибывают в контрольную точку с целью взятия проб, проведения замеров, получения фото- и видеоизображений.

**Выполняющая миссию группа** состоит из  $m$  аппаратов, функционально идентичных между собой. В то же время аппараты группы могут различаться скоростями движения в водной среде при перемещении между целями. Таким образом, каждый аппарат  $k$  характеризуется своими текущими координатами  $(x^k, y^k, z^k) \in D$ , а также крейсерской скоростью движения  $v^k$ . Скорость каждого АНПА позволяет определять, за какое время им будет пройден тот или иной отрезок пути. За  $\tau_{ij}^k$  в дальнейшем будем обозначать временные затраты на преодоление аппаратом  $k$  расстояния между двумя целями миссии  $i$  и  $j$ , а за  $\tau_i^k$  – временные затраты на достижение

Таблица 1. Переменные и параметры маршрутизации АНПА

Рабочая область	Цели миссии	Группы АНПА
Область: $D = X \times Y \times Z$	Количество целей: $N$	Размер группы: $m$
Высоты рельефа дна: $\zeta(x, y) \in Z, x \in X, y \in Y$	Множество индексов целей миссии: $\Omega = \{1, \dots, N\}$	Координаты аппарата $k$ : $(x^k, y^k, z^k) \in D$
	Координаты цели $i$ : $(x_i, y_i, z_i) \in D$	Крейсерская скорость аппарата $k$ : $v^k$
	Тип регулярности цели $i$ : $T_i = \{1, 2\}$	Время на прохождение аппаратом $k$ расстояния от цели $i$ к цели $j$ : $\tau_{ij}^k$
	Периодичность $i$ -й цели: $p_i$	Радиус гидроакустического канала связи: $R_0$
	Время обследования цели $i$ : $s_i$	Маршрут аппарата $k$ : $r^k$
	Время с последнего посещения цели $i$ : $\Delta\tau_i$	Длительность маршрута аппарата $k$ : $t(r^k)$
		Цель, принадлежащая маршруту АНПА: $v(r) \in \Omega$
		Время нахождения аппарата в режиме ожидания перед исследованием $i$ -й цели $\alpha_i = 0$
		Маршрут группы АНПА: $G$

цели  $i$  из текущего местоположения аппарата  $k$ .

Сам процесс выполнения миссии является автономным, а все расчеты производятся исключительно на борту аппаратов группы. Для координации действий группа аппаратов, выполняющая миссию, оснащена средствами передачи данных. Используемый для этого гидроакустический канал связи действует только на ограниченном расстоянии  $R_c$ . Данные между АНПА могут передаваться как напрямую, так и через другие АНПА группы. Таким образом, для полной синхронизации актуальных данных внутри группы все АНПА должны образовывать связный граф с длинами дуг (расстояниями между аппаратами), не превышающими радиус действия связи  $R_c$ . Маршруты группы АНПА, гарантирующие возможность регулярной информационной синхронизации, называются *коммуникационно устойчивыми*.

Требование коммуникационной устойчивости маршрутов АНПА в первую очередь связано с динамическим характером выполняемой миссии. Во-первых, результаты самих наблюдений могут потребовать изменения параметров целей, вплоть до их удаления, а во-вторых, неопределенность внешних условий, характерная для подводной среды, может приводить к непредвиденным изменениям состояния рабочей группы АНПА. Все эти изменения могут происходить в реальном времени, вызывая необходимость корректировки текущего плана (перепланирования) с целью максимизации эффективности работы группы в новых условиях. К числу событий, требующих корректировки маршрута, следует отнести:

- изменение значений периодичности целей;
- изменение типов целей;

- добавление новых или отказ от текущих целей;
- изменение состава группы аппаратов.

**Маршрут каждого аппарата**  $r^k = \langle v_1(r), v_2(r), \dots, v_h(r) \rangle$  представляет собой конечный набор целей, упорядоченных по времени их посещения. Здесь каждой вершине  $v_i(r) \in \Omega$  соответствует номер цели, которая находится  $i$ -й в очереди на посещение согласно маршруту  $r^k$ , при этом любая цель может войти в маршрут АНПА более, чем один раз. Групповой маршрут  $G$ , таким образом, состоит из набора маршрутов  $\{r^1, \dots, r^m\}$ .

Одной из основных характеристик маршрута АНПА является его временная длительность  $t(r^k)$ :

$$t(r^k) = \tau_{v_1(r)}^k + o_{v_1(r)} + s_{v_1(r)} + \sum_{i=2}^h (\tau_{v_i(r)v_{i-1}(r)}^k + o_{v_i(r)} + s_{v_i(r)}),$$

$$0 \leq o_{v_i(r)} < p_{v_i(r)},$$

где  $o_i$  – время ожидания аппаратом  $k$  начала обследования  $i$ -й цели. Для целей *нестрогой регулярности* ( $T_i=1$ ) является справедливым  $o_i=0$ , т.е. цели такого типа исследуются сразу, как только в них прибывает любой аппарат группы. *Строгие регулярные* цели, в свою очередь, должны исследоваться только точно через равные промежутки времени, формируя время ожидания на момент прибытия АНПА в цель  $i$  как  $o_i = \max \{p_i - \Delta\tau_i, 0\}$ .

**Эффективность выполнения групповой миссии** определяется в первую очередь регулярностью посещения целей аппаратами группы. Прибытие аппарата в цель  $i$  позже требуемого момента времени  $\Delta\tau_i > p_i$  (опоздание) является нежелательным и должно штрафовать согласно критерию эффективности маршрута. Использование критерия, учитывающего особенности задачи, позволит сравнивать различные

маршруты в процессе планирования и выбирать из них наиболее эффективные.

В случае невозможности одновременного посещения всех целей согласно значениям их периодичности критерий должен учитывать два возможных типа решений:

- а) маршруты, обеспечивающие обязательное посещение всех целей миссии при минимальном объеме опозданий;
- б) маршруты, включающие только часть заданного множества целей, но гарантирующие отсутствие опозданий.

Таким образом, ставится задача поиска допустимого группового маршрута, обеспечивающего минимальный объем опозданий.

## 2. Особенности задачи

При решении описанной задачи в первую очередь требуется учитывать следующий ряд особенностей:

- неопределенное время длительности миссии;
- динамику условий выполнения миссии;
- требование коммуникационной устойчивости;
- необходимость поиска эффективного решения при большом количестве целей.

С учетом указанных особенностей предлагается следующий декомпозиционный подход к решению задачи: разделить все время выполнения групповой миссии на конечные временные периоды (периоды планирования), по окончании которых происходит актуализация данных о миссии. В этом случае процесс выполнения миссии на основе периодов планирования может быть представлен в виде блок-схемы (рис. 1).

При такой схеме работы группы во время движения в рамках текущего периода планирования все



Рис. 1. Организация групповой миссии АНПА на основе периодов планирования

аппараты группы, оценивая условия миссии и состояние группы на момент окончания движения, используют эту информацию для расчета группового маршрута на следующий период планирования. Тогда процесс актуализации данных при проведении сеансов связи подразумевает не только уточнение текущего состояния аппаратов и условий миссии, но и обмен внутри группы лучшими найденными каждым АНПА решениями на следующий период движения. Среди полученных всеми аппаратами группы маршрутов наилучший выбирается в качестве утвержденного маршрута на новый период планирования. Такой подход позволяет естественным образом распределить вычислительную нагрузку между АНПА.

В случае поиска решения на один период планирования описанная задача будет представлять собой вариацию задачи маршрутизации, которая, как известно, является NP-трудной, т.е. ее решение в общем случае не может быть найдено за полиномиальное время. Основными отличительными особенностями рассматриваемой задачи маршрутизации на одном периоде планирования являются:

- 1) отсутствие общей точки окончания движения и как следствие – необходимость проверки конечного положения группы на коммуникационную устойчивость;
- 2) необходимость учитывать состояние миссии по завершении движения на текущем периоде

планирования, так как оно будет являться начальным состоянием для следующего периода;

3) необходимость выбора целей, которые будут посещены с опозданием или вообще исключены в случае невозможности своевременного посещения всех целей миссии.

Важным аспектом эффективного выполнения групповой миссии по предложенной схеме является определение рационального горизонта планирования (длительности одного периода планирования). Чрезмерное увеличение горизонта планирования ведет к ухудшению качества получаемого решения, так как вместе с длиной маршрута растет размерность задачи, что приводит к росту вычислительной сложности. Высокая вычислительная сложность задачи не только вредна с точки зрения нагрузки на бортовую вычислительную систему АНПА, но и может приводить к ситуации, когда группа в процессе движения по текущему маршруту не успевает найти качественный допустимый маршрут на следующий период планирования. Кроме того, длительное планирование является неэффективным в условиях постоянных изменений внешней среды. С другой стороны, выбор слишком короткого горизонта планирования также чреват понижением общей эффективности группы АНПА, так как решение задачи в этом случае сводится к процедуре «жадной» оптимизации.

### 3. Расчет эффективности маршрутов

Переход к поиску маршрута в рамках одного периода планирования ограниченной длительности позволяет явным образом сформировать критерий оценки эффективности этого маршрута на данном периоде. Для этого расширим описание каждой цели  $i$  функцией  $a_i(t)$ , которую будем называть *функцией актуальности*, а ее значение в момент времени  $t$  – *актуальностью* цели. Функция актуальности регулярной цели  $i$  имеет следующий вид:

$$a_i(t) = \begin{cases} \delta_i(t - (t_{ik} + s_i)), & t \in [t_{ik+1}, t_{ik+1} + p_i) \\ 0, & t \in [t_{ik}, t_{ik+1}) \end{cases}, k=1, 2, \dots$$

$$t_{ik+1} = t_{ik} + s_i, t_{ik+1},$$

$$t_{ik} = t_{ik}, t_{ik} + s_i,$$

где  $t_{i1}, t_{i2}, \dots$  – последовательность моментов посещения  $i$ -й цели аппаратами группы, а  $\delta_i(t)$  – неубывающая функция роста актуальности,  $\delta_i(0) = 0$ . При этом единое для всех целей пороговое значение актуальности  $\bar{a}$  достигается за период времени  $p_i$ , а посещение цели любым АНПА группы ведет к обнулению значения ее актуальности.

Функции роста актуальности цели  $\delta_i(t)$  определяет степень необходимости посещения цели  $i$  в зависимости от времени, прошедшего с ее последнего посещения, и определяет размер штрафа в случае опоздания. В качестве такой функции может быть использована, например, линейная функция вида  $\delta_i(t) = \frac{\bar{a}}{p_i}t$ , которая

не только проста в реализации, но и формирует относительную важность всех целей таким образом, чтобы обеспечить своевременное посещение целей с наименьшей периодичностью (рис. 2). Например, АНПА предпочтут опоздать на час в цель, периодичность ко-

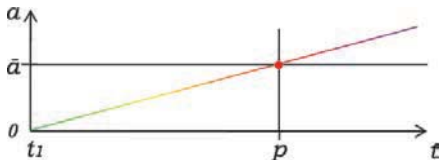


Рис. 2. Рост актуальности цели во времени с момента ее посещения аппаратом группы

торой составляет 10 часов, чем на тот же час в цель с периодичностью 2 часа.

Функция штрафа за прибытие АНПА в момент  $t$  в цель  $i$  с опозданием имеет вид:

$$\varphi(a_i, t) = \begin{cases} a_i(t) - \bar{a}, & a_i(t) > \bar{a} \\ 0, & a_i(t) \leq \bar{a} \end{cases}$$

Общий штраф группы при движении по маршруту  $G$  в этом случае составит:

$$\Phi(G) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^h \varphi(a_{ij}, t_{ij}), \quad (1)$$

где под  $v$  понимается  $v_j(r_j)$ , а значение  $t_v$  определяется как момент времени, в который соответствующая цель будет посещена согласно маршруту. Последовательность моментов времени  $t_v$  для каждой цели формируется по результатам моделирования движения АНПА в соответствии с групповым маршрутом.

Если ограничиться только штрафом (1), то при невозможности посещения всех целей вовремя группа АНПА будет игнорировать часть из них. Для исключения подобных случаев в целевую функцию было введено еще одно слагаемое, регулирующее состояние миссии, которое должно быть «передано» на следующий период планирования:

$$\Psi(G) = \sum_{i=1}^N a_i(t(G)), \quad (2)$$

где  $t(G)$  — момент завершения движения группы согласно маршруту  $G$  (длительность группового маршрута). Значение функции (2) дает в некотором роде прогноз условий для следующего периода плани-

рования. Использование такого прогнозного значения позволяет обеспечивать маршруты двумя положительными свойствами одновременно: во-первых, эта функция является своеобразным механизмом, запрещающим игнорировать цели миссии; а во-вторых, она косвенным образом нормирует длительности маршрутов всех АНПА, т.к. штрафует ситуации, когда часть аппаратов уже пришла в свои конечные точки, а другая еще выполняет обход.

Таким образом, итоговый критерий эффективности маршрута имеет следующий вид:

$$F(G) = \omega \cdot \Phi(G) + \Psi(G) \rightarrow \min, \quad G \in Z,$$

где  $Z$  — множество всех возможных коммуникационно устойчивых маршрутов, а весовой коэффициент  $\omega$  позволяет выбирать режим работы группы в случае невозможности посещения всех целей вовремя: при близком к единице значении коэффициента  $\omega$  группа будет посещать все цели миссии, выбирая для «опозданий» наименее приоритетные из них (рис. 3, а); при значениях  $\omega$ , значительно превышающих единицу, группой будет выбираться некоторое подмножество тех целей, которые могут посещаться строго своевременно, а оставшиеся цели будут игнорироваться (рис. 3, б).

#### 4. Гибридный эволюционный подход к планированию групповых миссий АНПА

Для обширного класса ЗКО не существует алгоритмов нахождения оптимальных решений за полиномиальное время, что приводит к необходимости нахождения только лишь приближенных рациональных решений, поиск которых не требовал бы значительных временных и вычислительных затрат, что обычно достигается при использовании различных эвристических методов. К задачам этого класса могут применяться совершенно разные подходы, основанные на методах из различных областей исследования операций, при этом очевидно, что не существует унифицированного алгоритма, обслуживающего весь спектр задач данного класса, — каждое ограничение и требование к конечным маршрутам порождает необходимость оригинального подхода к структуре разрабатываемого алгоритма.

Исчерпывающий анализ различных подходов [9] выявил, что эволюционные алгоритмы для решения ЗКО превосходят в целом любые другие эвристические или метаэвристические подходы, представленные в литературе. Основным преимуществом эволю-

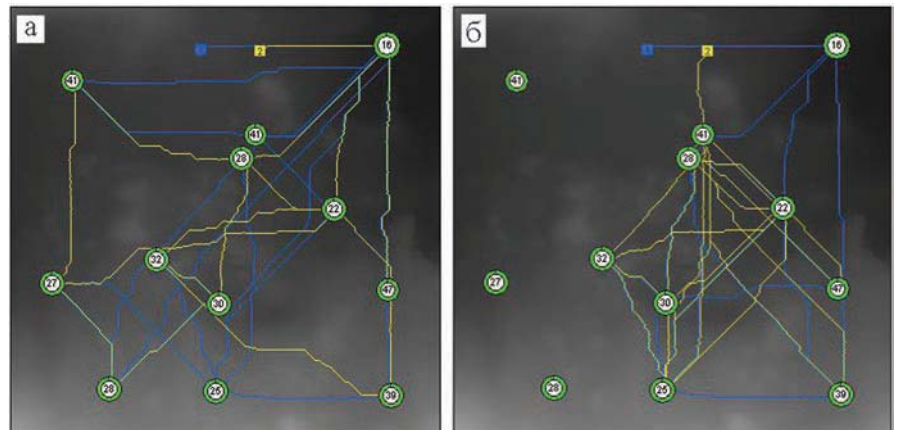


Рис. 3. Вид группового маршрута для двух АНПА (синий и желтый квадраты) в зависимости от выбранного режима работы группы: а — посещать все цели, б — исключить опоздания

ционных алгоритмов является их способность строить решения для плохо структурированных задач и постановок со сложным набором ограничений, т.к. они требуют относительно небольшого количества информации о природе самой задачи. Кроме того, эффективность работы эволюционных алгоритмов может быть значительно увеличена за счет их гибридизации с методами локального поиска и эвристиками улучшения.

Сформулированная задача планирования групповых маршрутов АНПА не имеет четкой «окрестной» структуры, что затрудняет поиск и прогнозирование качественных допустимых решений, поскольку они могут не находиться в окрестности других эффективных или допустимых решений в пространстве поиска. Эволюционный алгоритм, лежащий в основе решения задачи планирования, должен обладать специализированными генетическими операторами, включать эвристики локального поиска и другие методы локального улучшения решений. Блок-схема предлагаемого гибридного алгоритма приведена на рис. 4.

Работа алгоритма начинается с инициализации начальных данных, включающих актуальный список целей, текущее состояние группы, а также базовые параметры самого алгоритма. Затем начальная популяция хромосом-маршрутов заполняется таким образом, чтобы она покрывала значительную часть пространства поиска, но при этом содержала набор различных «хороших» решений. Это обеспечивается одновременным использованием трех различных конструктивных эвристик – одной последовательной и двух параллельных.

Сгенерированная популяция оценивается целевой функцией, учитывающей не только эффективность текущего маршрута в рамках горизонта планирования, но и оценку сложности поиска качественного маршрута на следующем периоде планирования. По результатам ранжирования имеющейся популяции согласно приспособленности особей, по турнирной схеме происходит отбор решений, которые, в зависимости от вероятностных генетических параметров, будут использованы для воспроизведения потомства

путем либо скрещивания сформированных пар решений, либо мутации отдельно выбранной хромосомы.

В классическом генетическом алгоритме прошедшие отбор решения сначала подвергаются воздействию оператора скрещивания, затем получившееся решение подвергается мутации. В предложенном подходе от такой схемы было принято решение отказаться, т.к. она может приводить к потере промежуточной генетической информации, поэтому каждое решение, прошедшее отбор механизмом селекции, подвергается воздействию только одного из генетических операторов, который выбирается согласно вероятностным параметрам.

Специализированные генетические операторы состоят из двух типов скрещивания и много-режимной мутации. Первый тип скрещивания представляет из себя эвристическую модификацию двухточечного кроссовера, в то время как второй стремится объединить общие характеристики родительских особей с чертами лучшего известного решения.

Механизмы параллельных популяций (островов) и простого элитизма (гарантированного переноса лучших решений в следующее поколение) применяются на этапе формирования новой популяции, обеспечивая более быструю сходимость алгоритма, вместе с тем сохраняя возможность выходов из локальных оптимумов. Процедура удаления клонов позволяет сохранять разнообразие генерируемых популяций.

С целью дальнейшего улучшения маршрутов, кодируемых хромосомой, к популяции периодически применяются методы детерминированного эвристического поиска для более глубоких локальных исследований. В качестве таких методов используются



Рис. 4. Блок-схема предложенного гибридного эволюционного алгоритма. Цветом выделены оригинальные блоки алгоритма и авторские модификации известных процедур

оригинальные модификации 2-орт обмена и  $\lambda$ -замены [9].

Эволюционный процесс повторяется, пока не будет выполнен критерий остановки вычислений, определяемый невозможностью проведения улучшений решений ни одной из представленных локальных эвристик.

**Процедура приведения решения к допустимости.** Все генерируемые алгоритмом маршруты проходят процедуру приведения их к допустимости с точки зрения ограничения на обеспечение связи. Для этого маршрут итеративно модифицируется согласно приведенной ниже процедуре до момента, пока он не будет удовлетворять требованиям коммуникационной устойчивости:

1. Граф, образованный конечными целями всех АНПА, проверяется на связность с учетом только тех дуг, длина которых не превышает радиус связи.

2. В случае недопустимости решения вычисляется центр тяжести всех вершин образованного графа.

3. Наиболее удаленная от центра тяжести конечная цель заменяется в маршруте соответствующего АНПА на цель, наиболее близкую к нему из всего множества целей.

4. Вернуться к пункту 1.

**Механизм адаптации.** Для повышения эффективности работы механизма создания новой популяции параметры эволюционного алгоритма, задающие вероятность применения всех генетических операторов, изменяются перед запуском каждой итерации алгоритма. Такие изменения, основанные на текущей способности каждого из операторов привести к улучшению решений, позволяют адаптировать генетический алгоритм под текущий этап вычислений. Использование механизма адаптации

параметров генетического алгоритма, задающих вероятности применения к особи тех или иных операторов скрещивания и/или мутации, значительно увеличивает скорость работы алгоритма в тех случаях, когда одни операторы начинают работать заметно лучше других.

В качестве регулируемых параметров генетических алгоритмов выступают:

- вероятность выбора между скрещиванием или мутацией особи;
- вероятность выбора каждого из двух операторов скрещивания;
- вероятность выбора каждого из пяти режимов мутации.

Таким образом, механизм адаптации должен отслеживать пути, наиболее часто ведущие к улучшениям решения, и повышать вероятность их выбора для следующего поколения решений. Структура алгоритма оптимизации муравьиной колонией позволяет простейшим образом реализовать такую адаптацию параметров.

В этом случае каждая особь генетического алгоритма (групповой маршрут  $G$ ) будет являться одновременно и муравьем, который, проходя через цепочку генетических операторов, ставит на них метки, если их работа привела к итоговому улучшению этой особи. По завершению каждой итерации генетического алгоритма вероятности применения всех его операторов перераспределяются согласно количеству меток на них, а механизм исчезновения меток возвращает равномерное распределение в случае, если текущие параметры начинают терять свою актуальность.

## 5. Результаты тестовых расчетов

Для отладки разработанного алгоритма, проведения тестовых расчетов и вычислительных экс-

периментов была разработана моделирующая среда AUV Mission Planner, в которой предложенный гибридный эволюционный алгоритм был реализован в виде библиотеки классов и процедур. Среда AUV Mission Planner позволяет создавать описания миссий для группы АНПА, задавать параметры алгоритма, выполнять поиск эффективных маршрутов, удовлетворяющих заданным ограничениям, а также симулировать процесс выполнения миссии согласно построенным маршрутам. Разработанная среда обладает возможностью редактирования данных на основе их визуального представления и предоставляет пользователю обширный функционал по автоматическому запуску серий расчетов и сбору подробной статистики.

На основе ряда вычислительных экспериментов, проведенных при помощи комплекса AUV Mission Planner, найдены наилучшие параметры алгоритма, гарантирующие его качественную работу на различных типах тестовых задач. Показано влияние используемых эвристик на качество получаемых решений и время их нахождения. По результатам серии расчетов на ряде тестовых задач было рассчитано среднее отклонение решений, получаемых по результатам работы программы, от оптимальных решений, найденных полным перебором. Так, в среднем общее время опоздания при посещении всех целей маршрута превосходит объем опоздания оптимального решения менее, чем на 0,7% от длительности периода планирования (горизонта планирования).

Продемонстрируем результаты работы алгоритма на тестовом примере расчета маршрута для группы из трех АНПА, выполняющей миссию из 25 целей различных



типов регулярности на слабо пересеченном рельефе (рис. 5, а). Значения периодичности целей располагаются в промежутке от 20 до 80 минут, длительность горизонта планирования составляет 200 минут (более 50 посещений целей). За 170 секунд работы алгоритма было получено субоптимальное решение (рис. 5, б) на один период планирования, обеспечивающее своевременное посещение большинства целей с общим опозданием в 104 секунды, в то время как оптимальный маршрут приводит к 37 секундам опоздания (~0,56% от длительности периода планирования). На рис. 5, в приведен скриншот окна программы AUV Mission Planner в процессе моделирования движения группы АНПА по найденному маршруту (рис. 5, б), на рис. 5, г показан момент установки связи внутри группы для последующего обмена данными.

На рис. 6 приведены графики изменения значений актуальности трех целей (из двадцати пяти) во времени, полученных по результатам моделирования движения группы АНПА (рис. 5). В левом верхнем углу каждого графика указан номер соответствующей цели,

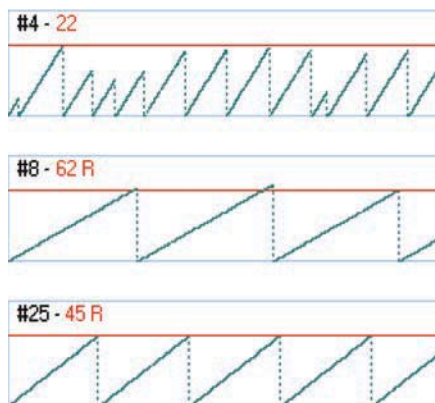


Рис. 6. Графики изменения актуальности целей в процессе выполнения миссии

а также ее параметры (периодичность и тип регулярности). Красной чертой отмечено пороговое значение  $\bar{a}$ , превышение которого говорит об опоздании АНПА. Обрыв линии графика означает, что в соответствующий момент времени цель была исследована одним из АНПА группы, после чего значение актуальности цели было сброшено на 0. Можно видеть, что цели на первом (нестрого регулярная цель) и третьем (строго регулярная цель) графиках исследовались вовремя на протяжении всей миссии, в то время как часть посещений строгой регулярной цели со второго графика была произведена

с опозданием. За невозможностью посетить вовремя все цели миссии для несвоевременного посещения были выбраны цели с наибольшим значением периодичности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан оригинальный подход к решению задачи маршрутизации движения группы АНПА при выполнении регулярного мониторинга, основанный на разбиении времени выполнения миссии на периоды планирования и поиске маршрута на каждый период с использованием разработанной модификации эволюционных алгоритмов. Предложенный подход позволяет существенно снизить трудоемкость решения задачи путем распределения вычислений между аппаратами группы, а также за счет использования эвристик, значительно сужающих пространство поиска. Таким образом, расчет маршрутов не требует серьезной вычислительной нагрузки и ориентирован на реализацию разработанных алгоритмов на борту АНПА.

На основе серии вычислительных экспериментов была определена степень влияния отдельных эвристик на качество решений и скорость их получения, что, в свою очередь, позволило эффективным образом выстроить структуру алгоритма и определить ключевые параметры его работы. Результаты численного моделирования показали высокую продуктивность подхода в целом в решении задачи планирования групповых миссий при различных условиях, что позволяет сделать вывод о его применимости для эффективной маршрутизации движения при выполнении широкомасштабных многоцелевых работ в качестве алгоритма высокоуровневого управления.

Предложенная постановка задачи маршрутизации движения группы АНПА относится к новому классу задач маршрутизации, требующему для своего решения

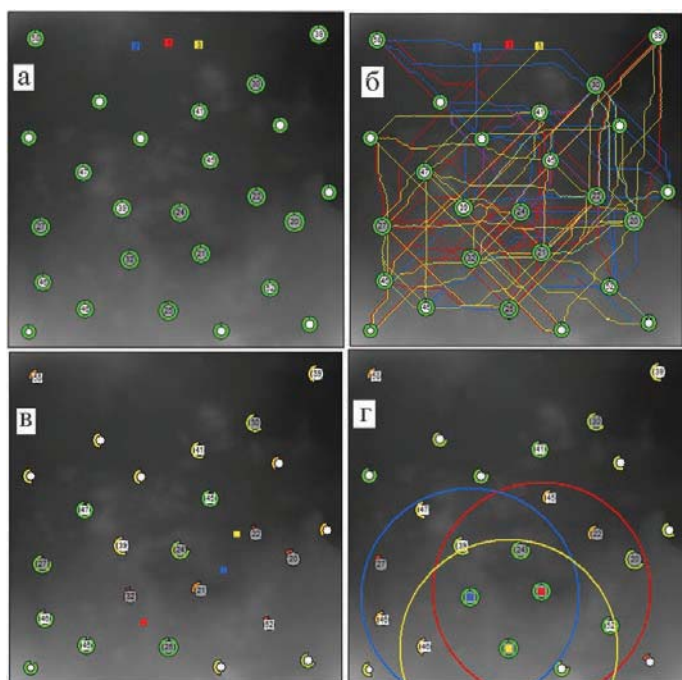


Рис. 5. План группового маршрута для трех АНПА (синий, красный и желтый квадраты) и процесс его выполнения аппаратами: а – начальные условия миссии; б – найденный групповой маршрут; в – состояние миссии в некоторый текущий момент времени; г – проверка группы на коммуникационную устойчивость

оригинального подхода, и может быть расширена путем введения в нее новых сущностей, параметров и ограничений, таких как одновременная работа с разовыми и регулярными целями, гетерогенность группы АНПА и др.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 14-07-00740-а, 14-07-31192-мол-а), Программы Президиума РАН (проект № 15.1) и Сибирского отделения РАН (проект № 10).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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. 398 с.
2. Козлов Р. И., Максимкин Н. Н., Киселев Л. В., Ульянов С. А. Устойчивость конфигураций группового движения автономных подводных роботов в условиях неопределенности // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 9. С. 40–46.
3. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 280 с.
4. Mouraa A., Rijo R., Silvac P., Crespos S. A multi-objective genetic algorithm applied to autonomous underwater vehicles for sewage outfall plume dispersion observations // Applied Soft Computing archive. 2010. Vol. 10. Issue 4. P. 1119–1126.
5. Туфанов И. Е., Щербатюк А. Ф. Разработка алгоритмов группового поведения АНПА в задаче обследования локальных неоднородностей морской среды // Управление большими системами. 2012. № 36. С. 262–284.
6. Chow B., Clark C. M., Huissoon J. P. Assigning closely spaced targets to multiple autonomous underwater vehicles // Journal of Ocean Technology. 2011. Vol. 6. Issue 1. P. 57–68.
7. Deng. Y., Beaujean P-P. J., An E., Carlson E. Task Allocation and Path Planning for Collaborative Autonomous Underwater Vehicles Operating through an Underwater Acoustic Network // Journal of Robotics. Vol. 2013. P. 1–15.
8. Киселев Л. В., Инзарцев А. В., Бычков И. В., Максимкин Н. Н., Хмельнов А. Е., Кензин М. Ю. Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 8. С. 34–43.
9. Braysy O., Gendreau M. Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms // Transportation science. 2005. Vol. 39, No. 1. P. 104–118.

УДК 629.052.6:629.584

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВИДЕОНАВИГАЦИИ В СОСТАВЕ КОНТУРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

**А. Н. Кропотов,  
В. М. Плюсунов,  
А. А. Макашов**

Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана»<sup>1</sup>

В современных условиях актуальной задачей подводной робототехники является необходимость точного позиционирования подводных аппаратов вблизи дна или объекта работ. Возможным вариантом решения такой задачи является использование системы локальной видеонавигации. С точки зрения системы управления, помимо точностных параметров, имеют значение быстродействие, устойчивость и характер переходных процессов в системе видеонавигации. Целью работы является проведение анализа параметров системы видеонавигации на основе численного и полунатурного моделирования. В работе оцениваются реализации алгоритмов видеонавигации на основе метода оптического потока и сопоставления дескрипторов SURF и BRISK. На основе результатов моделирования были сформулированы предложения об области применимости методов.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач, стоящих перед разработчиками систем управления (СУ) подводных аппаратов (ПА), является обеспечение возможности высокоточного позиционирования аппарата вблизи донной поверхности и/или объекта работ. Для решения этой задачи необходимо осуществлять измерение локальных перемещений подводного аппарата, используемых для замыкания обратных связей контуров СУ.

Можно выделить три следующих подхода к измерению локальных перемещений ПА:

1) использование данных о линейных ускорениях ПА, измеряемых с помощью устройств инерциальной навигации;

2) использование данных о линейных скоростях ПА, измеряемых с помощью абсолютных гидроакустических лагов;

3) использование компьютерной обработки видеоизображений или изображений акустической природы донной поверхности и/или объекта работ с целью определения приращений линейных координат ПА между последовательно снятыми кадрами аналогично описанному в [1].

Для определения линейных перемещений в рамках первых двух подходов необходимо осуществление интегрирования по времени, что вносит накапливающуюся с течением временем неустранимую

<sup>1</sup> 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1. E-mail: alex.kropotov@sm.bmstu.ru; sm42@sm.bmstu.ru; amakashov@bmstu.ru