

УДК 681.5

# КООРДИНАЦИЯ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА БОЛЬШОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ

**М.Ю. Кензин**

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН*  
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 134  
E-mail: [gorthauers@gmail.com](mailto:gorthauers@gmail.com)

**И.В. Бычков**

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН*  
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 134  
E-mail: [dstu@icc.ru](mailto:dstu@icc.ru)

**Н.Н. Максимкин**

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН*  
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 134  
E-mail: [mnn@icc.ru](mailto:mnn@icc.ru)

**Ключевые слова:** групповое управление, мобильные роботы, планирование миссии, топливные ограничения, задача составления расписания, задача маршрутизации транспорта, систематический мониторинг, эволюционные алгоритмы.

**Аннотация:** В докладе рассматривается задача управления гетерогенной группой автономных мобильных роботов, выполняющих динамическую миссию по продолжительному мониторингу заданной области, представленной в виде набора контрольных точек. Задача группы заключается в посещении всех таких точек с заданной периодичностью с целью осуществления регулярного освещения обстановки. Роботы в группе могут различаться по набору предустановленного бортового оборудования, емкости аккумуляторных батарей, а также по своим динамическим характеристикам. Длительное функционирование группировки при выполнении миссии обеспечивается возможностью пополнения аккумуляторных батарей на специальных стационарных док-станциях. Предлагается использование двухуровневого эволюционного подхода к организации эффективной работы группы в условиях динамической среды и коммуникационных ограничений.

## 1. Введение

Бурное развитие робототехники в последние десятилетия привело к значительному росту приложений для автономных транспортных средств в коммерческих и военных областях [1-3]. В ситуациях, когда требуется обеспечить мониторинг некоторого региона при нехватке времени или ресурсов на развертывание сети статического наблюдения (милитаристические операции, стихийные бедствия, труднодоступные регионы и др.), использование группы автономных мобильных роботов (АМР) позволяет добиться оперативного освещения обстановки в представляющих интерес областях. Зачастую,

при этом возникает задача распределения заданий и планирования маршрутов, когда каждому аппарату группы должна быть поставлена в соответствие последовательность посещений различных мест (контрольных точек) внутри региона миссии. При необходимости непрерывного проведения мониторинга на длительном промежутке времени, такие посещения приобретают регулярный характер [4], что приводит к значительному усложнению задачи групповой маршрутизации. С точки зрения математической модели, такая задача планирования представляет собой расширенную вариацию задачи маршрутизации транспорта, в которой заданное множество целей должно периодически посещаться транспортными средствами не реже установленной частоты. В то же время, в зависимости от выполняемой задачи, технических особенностей АМР и специфики среды, на работу группы может накладываться целый ряд дополнительных пространственно-временных ограничений, свойственных другим подклассам задач маршрутизации.

Существенным ограничением в аспекте высокой продолжительности миссии является необходимость пополнения группой топливных ресурсов прямо в процессе выполнения миссии. В зависимости от типа используемых АМР и среды их функционирования (подводные, наземные или летательные аппараты) для этого могут использоваться стационарные или мобильные док-станции. Таким образом, полностью автономная система управления должна не только координировать группу при выполнении заданного множества заданий в условиях действующих ограничений, но и регулировать процедуру регулярной подзарядки аккумуляторных батарей АМР. При этом, необходимо учитывать, что процесс выполнения миссии не должен прерываться на время подзарядки, а значит, необходимо выбирать такой порядок пополнения роботами заряда аккумуляторных батарей, чтобы остающаяся для выполнения заданий группировка всегда была в состоянии обеспечить своевременный мониторинг области.

Такое двухуровневое планирование групповой стратегии должно осуществляться одновременно надежным и гибким способом, чтобы обеспечить оперативную и корректную обработку любых незапланированных изменений ситуации в условиях ограниченной коммуникации внутри группы. В связи с этим, на первый план выходит разработка эффективных интеллектуальных подходов к организации автономной системы группового управления АМР.

## 2. Математическая модель задачи

В общем случае, продолжительные миссии АМР по систематическому мониторингу состоят в посещении и обследовании (проведении ряда работ) группой мобильных роботов заданного множества целей с рекомендуемой частотой на длительном отрезке времени. Задача маршрутизации группы при этом заключается в построении такого допустимого группового маршрута, который обеспечивал бы, насколько это возможно, своевременное обследование всех целей в условиях периодической смены состава действующей группировки для осуществления подзарядки аккумуляторных батарей. В дальнейшем, будем называть задачу, исследуемую в рамках данного доклада, *задачей комплексного мониторинга*. Приведем ее формальную общую постановку.

Обозначим через  $T$  длительность всей миссии. Пусть изначально миссия включает  $N = \{1, \dots, n\}$  целей (заданий), расположенных в рамках обозначенной области. Каждой цели поставлен в соответствие требуемый для ее обследования тип бортовой аппаратуры робота  $e_i \in \{1, 2, \dots, l\}$ . Кроме своего местоположения и технических требований, каждая цель  $i \in N$  характеризуется также своим типом  $t_i$ , требуемой периодичностью об-

следований  $p_i$  и длительностью разового обследования  $s_i$ . Значение периодичности  $p_i$  означает, что длительность временного интервала между двумя последовательными посещениями  $i$ -ой цели роботами группы не должна превышать  $p_i$ . Для целей с нестрогим типом ( $t_i = 0$ ) допускается преждевременное обследование до истечения такого интервала  $p_i$ . В свою очередь, для строгих целей ( $t_i = 1$ ), в случае прибытия к цели ранее, чем через установленный интервал  $p_i$ , робот вынужден будет пребывать в режиме ожидания вплоть до истечения требуемого интервала. В случае прибытия АМР с опозданием, новый интервал  $p_i$  будет отсчитываться не от ожидаемого, а от фактического времени последнего обследования цели.

Пусть группа автономных мобильных роботов, выполняющая миссию, изначально состоит из  $m$  аппаратов. Аппараты в группе могут различаться между собой по своей крейсерской скорости движения  $v^k$ , емкости аккумуляторных батарей  $b^k$ , и набору предустановленного бортового оборудования  $h_{ij} \in \{0,1\}$ ,  $j = 1, \dots, l$ ,  $k = 1, \dots, m$ , где  $l$  – количество всех видов аппаратуры. Здесь допускается, что все роботы перемещаются между целями с равномерной крейсерской скоростью, а емкость аккумуляторов определяется не в единицах энергии, а в средней длительности функционирования АМР.

Ограниченная емкость аккумуляторных батарей вынуждает роботов группы периодически прерывать работу для осуществления подзарядки на специальных зарядных док-станциях. Предполагается, что количество зарядных баз и доков согласовано с количеством аппаратов в группе, что означает, что в процессе выполнения миссии любой робот группы сможет быть обслужен на зарядной базе в любой момент времени. Обозначим среднюю скорость зарядки всех батарей через постоянную величину  $0 < c < 1$ . Тогда, для полной зарядки аккумуляторной батареи емкостью  $b$  потребуется  $c \cdot b$  времени.

На рис. 1 схематически представлен процесс выполнения миссии по мониторингу группой из четырех наземных беспилотных транспортных средств в предложенной выше постановке. В изображенный момент времени действующая группировка состоит из двух роботов, выполняющих обследование текущих целей; еще один аппарат временно вышел из группы и движется к док-станции для восполнения заряда своих аккумуляторных батарей; четвертый аппарат недавно закончил подзарядку и находится на пути к точке группового сбора. После прибытия четвертого АМР в точку сбора, действующая группировка уже в обновленном составе продолжит обход целей.



**Рис. 1.** Схематическое представление выполнения миссии по комплексному мониторингу области гетерогенной группой наземных АМР с непостоянным составом.

Описанная задача комплексного мониторинга содержит в себе особенности сразу нескольких известных NP-трудных транспортных задач: систематического наблюдения (*persistent surveillance problem*) [5], «зеленой» маршрутизации (*green vehicle routing problem*) [6], задачи мультикоммивояжера и ряда других вариаций классической задачи маршрутизации транспорта. Такие задачи маршрутизации, объединяющие в себе целый спектр различных ограничений и требований, в современной литературе принято относить к широкому классу комплексных или много-атрибутных задач маршрутизации (*rich/multi-attribute vehicle routing problem*,) [7]. В литературе представлено большое количество работ, посвященных перечисленным моделям транспортных задач, однако, подавляющее их большинство исследует достаточно узкие классы постановок.

### 3. Двухуровневая система управления

Предлагается использование двухуровневой системы управления для обеспечения групповых миссий по регулярному мониторингу большой продолжительности. На двух уровнях предлагаемого подхода реализуется динамическое планирование групповой стратегии и локальное распределение целей (маршрутизация), соответственно. Так, цель динамического планировщика миссии на верхнем уровне – производить декомпозицию миссии, обеспечивающую регулярность групповых сборов (для проведения коммуникационного обмена между членами группы) и общее снижение вычислительной нагрузки при расчете маршрутов. В свою очередь, задача планировщика нижнего уровня – распределить цели между роботами группы и выбрать эффективный порядок их обхода с учетом технических требований и пространственно-временных ограничений.

В идеальном случае, когда точки разбиения при декомпозиции миссии будут соответствовать моментам возникновения любых значимых изменений, задача маршрутизации на каждом рабочем периоде группы (временном отрезке между двумя точками разбиения) будет являться статичной. Однако, поскольку достоверно предсказаны мо-

гут быть только те события, которые связаны с процессом подзарядки аккумуляторных батарей АМР, предлагается схема декомпозиции миссии, основанная на ожидаемом цикле ротации роботов (рис. 2), где каждая точка разбиения соответствует сбору текущей группировки в установленной области для отправки АМР на подзарядку и их приема после.

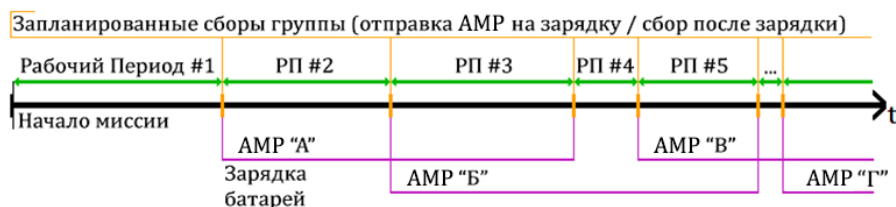


Рис. 2. Декомпозиция миссии на основе циклов зарядки роботов в группе

Таким образом, задача верхнеуровневого планировщика – регулировать действующий состав группы во времени, составляя расписание рабочих циклов каждого аппарата (времени отправки робота на зарядку и возвращения после). От группового расписания требуется, во-первых, удовлетворять критерию допустимости, то есть обеспечивать своевременную зарядку всех нуждающихся АМР. Во-вторых, остающаяся для выполнения работ группировка всегда должна быть технически в состоянии обследовать все цели миссии, то есть иметь в своем составе роботов со всеми возможными типами бортового оборудования. Кроме того, по возможности, должна быть исключена одновременная зарядка большого количества аппаратов, так как это в целом ведет к значительной потере производительности группировки, оставшейся для выполнения целей. В-третьих, в связи с тем, что на время групповых сборов проведение обследований временно приостанавливается, необходимо избегать чрезмерной частоты групповых сборов.

В свою очередь, планировщик маршрутов на низком уровне преследует цель эффективного локального планирования групповых маршрутов и траекторий при действующих ограничениях. Главная задача фазы маршрутизации – не только достичь своевременного обследования всех целей разнородной группой транспортных средств, но и обеспечить одновременное прибытие действующих АМР к точке сбора в конце рабочего периода. Кроме того, нельзя забывать, что задача маршрутизации на одном рабочем периоде не должна рассматриваться обособленно от глобальной задачи всей миссии.

Предлагается использование эволюционного подхода к реализации обоих уровней: в качестве планировщика на верхнем уровне используется классический генетический алгоритм с дополнительными операторами скрещивания и мутации; для маршрутизации на низком уровне разработан гибридный эволюционный алгоритм с применением специализированных эвристик и оригинальных процедур улучшения решений. Произведена программная реализация разработанного подхода, проведены тестовые расчеты (рис. 3).

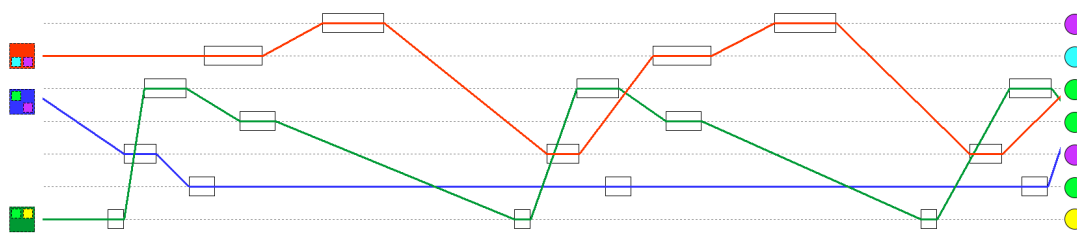


Рис. 3. Пример работы низкоуровневого планировщика для группы из трех АМР на семи целях.

## 4. Заключение

Результаты моделирования демонстрируют высокую эффективность предлагаемого подхода, в том числе на задачах большой размерности и в условиях высокой динамики среды. При этом, предлагаемая постановка задачи комплексного мониторинга и подход к ее решению могут быть применены к любой робототехнической платформе за счет значительного количества поддерживаемых требований и ограничений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-29-04238-офи\_м).

## Список литературы

1. Thiels C.A, Aho J.M., Zietlow S.P., and Jenkins D.H. Use of unmanned aerial vehicles for medical product transport // *Air medical journal*. 2015. Vol. 34, No. 2. P. 104-108.
2. Ozaslan T., Shen S., Mulgaonkar Y., etc. Inspection of penstocks and featureless tunnel-like environments using micro UAVs // *Field and Service Robotics*. Springer, 2015. P. 123-136.
3. Dunbabin M., Marques L. Robots for environmental monitoring: Significant advancements and applications // *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2012. Vol. 19, No. 1. P. 24-39.
4. Smith R.N., Schwager M., Smith S.L., etc. Persistent ocean monitoring with underwater gliders: Adapting sampling resolution // *Journal of Field Robotics*. 2011. Vol. 28, No. 5. P. 714-741.
5. Fargeas J.L., Hyun B., Kabamba P., Girard A. Persistent visitation under revisit constraints // *2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. 2013. P. 952-957.
6. Afshar-Bakeshloo M., Mehrabi A., Safari H., etc. A green vehicle routing problem with customer satisfaction criteria // *Journal of Industrial Engineering International*. 2016. Vol. 12, No. 4. P. 529-544.
7. Hartl R.F., Hasle G., Janssens G.K. Special Issue on Rich Vehicle Routing Problems // *Central European Journal of Operations Research*. 2006. Vol. 14. No. 2. P. 103-104.