

УДК 519.878, 519.1, 004.942

**Р.О. Лавренов (lavrenov@it.kfu.ru)**

**Е.А. Магид (dr.e.magid@ieee.org)**

Казанский Федеральный Университет, г. Казань

**А.Р. Габдуллин (a.gabdullin@innopolis.ru)**

Университет Иннополис, г. Иннополис

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУППЫ БПЛА И НАЗЕМНОГО РОБОТА ДЛЯ ЗА- ДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПУТИ С УЧЕТОМ ИЗМЕ- НЯЮЩИХСЯ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МАРШРУТА**

**Аннотация.** Важнейшими критериями оценки качества алгоритма построения маршрута для робота являются скорость выполнения поиска и оптимальность полученного пути относительно задаваемых пользователем параметров. В данной статье представлен набор ключевых параметров оптимизации пути, алгоритм поиска и результаты моделирования алгоритма в среде MATLAB и в среде ROS\Gazebo для моделирования совместной работы гетерогенной группы роботов.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** критерии оптимизации, диаграмма Вороного, планирование маршрута, групповое взаимодействие, ROS, Gazebo

### **Введение**

Планирование пути является важнейшей задачей при использовании автономных роботов в различных миссиях: сбор информации в заранее неизвестных динамических средах, поисково-спасательные операции или решение сложных транспортно-логистических задач. При планировании маршрута требуется учитывать множество факторов, зачастую выбирая между кратчайшей или наиболее

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-57-06010).

безопасной траекторией движения. В данной статье мы рассматриваем ключевые параметры оптимизации пути для планирования маршрута, согласно которым строится предварительный маршрут движения, а затем маршрут динамически корректируется локально в режиме реального времени через изменения весовых функций параметров оптимизации. Прототип алгоритма реализован в среде MATLAB и далее применен при моделировании действий гетерогенной группы роботов в среде ROS\Gazebo.

### **1 Глобальные и локальные методы поиска**

В задаче выбора пути для мобильного робота широко используются методы потенциального поля [1], методы дорожной картой [2] и другие. В качестве практического применения, метод вероятностных дорожных карт был задействован для навигации робота через лабиринт в составе гетерогенной группы [3]. Особый интерес для нашей задачи представляет метод диаграммы Вороного (ДВ), который позволяет строить максимально безопасный маршрут, так как ребра графа будут наиболее удалены от препятствий [4], [5], а найденные вершины графа можно использовать в алгоритме построения пути по сплайнам [1], рассчитывающем наиболее гладкую траекторию движения робота.

При поиске маршрута мобильным роботом важную роль играют и локальные методы планирования: в незнакомой или измененной среде робот должен уметь обнаруживать препятствия и динамически перестраивать свою траекторию для их обхода. Основными алгоритмами локального планирования являются методы семейства Bug, согласно которым робот движется по направлению к цели, огибая встреченные препятствия [6], [7]. В динамических условиях применяют также алгоритмы, базирующиеся на принципах алгоритмов потенциального поля [1], [8] или локального использования алгоритмов класса  $A^*$  [9], [10].

## **2 Поставленные задачи и настройки системы**

Основной задачей нашего проекта является расчет маршрута движения беспилотного наземного робота (БНР) с учетом изменения критериев оптимизации маршрута в режиме реального времени. Алгоритмом планирования маршрута выбран метод ДВ, который предоставляет набор траекторий, наиболее безопасных для обхода препятствий, а при динамических изменениях в окружающей среде позволяет локально пересчитать первоначальный граф за ограниченное время [12]. В рамках проекта используется российский гусеничный БНР «Инженер» (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Российский робот «Инженер»

## **3 Критерии оптимизации маршрута и реализация алгоритмов в MATLAB**

### **3.1 Алгоритм маршрутизации**

Реализация алгоритма планирования маршрута по ДВ осуществлялась в среде MATLAB [11]. Алгоритм работает следующим образом: (1) От каждой грани препятствия с определенным шагом строятся лучи; (2) В местах пересечения лучей от разных граней ставятся точки; (3) Точки от соседних лучей соединяются отрезками; (4) Соседние отрезки собираются в граф; (5) Конечный путь в графе рассчитывается по алгоритму Дейкстры.

Алгоритм модифицирован под текущую задачу: добавлена возможность создавать круглые и невыпуклые препятствия; метод построения ДВ изменен для работы со всеми типами препятствий; добавлены лучи от краев карты с целью возможности построения ДВ на карте с произвольным расположением препятствий и точек старта/цели. Пример расчета показан на Рисунке 2. Модификация реализации алгоритма ДВ позволяет работать не только с точками [5], но и поддерживает построение графа при любых положениях препятствий, начальной и конечной точек маршрута. Принадлежащие различным гомотопическим классам маршруты на карте рассчитываются с использованием ребер графа. Два маршрута принадлежат к одному классу, если возможно преобразование одного маршрута в другой при помощи неразрывной деформации.

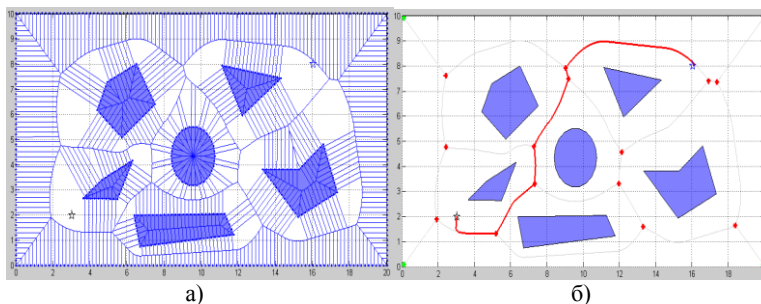


Рисунок 2 – а) Предварительный расчет ДВ; б) Финальная ДВ с точками ветвления и построенный путь (красный)

### 3.2 Критерии оптимизации маршрута

Построенный маршрут должен удовлетворять требованиям целевой функции и динамически пересчитывается при изменении этой функции. Мы выделили следующие ключевые параметры целевой функции [13]: длина пути, время прохождения маршрута, максимальное (или сред-

нее) расстояние до препятствий при прохождении маршрута, кривизна пути, время прямой видимости начальной позиции и время выхода напрямую до целевой позиции.

В симуляторе реализованы следующие параметры: длина пути, расстояние от препятствий, кривизна, время выхода на целевую позицию. Перебор ребер ДВ в первоначальном маршруте создает вариативность в различных гомотопиях, предоставляя опции для учета времени прямой видимости точек старта и цели. Для этого также сравниваются расстояния от точек старта/цели до первой кривой ДВ (Рисунок 3). По аналогии, замена вершин графа видимости позволяет использовать различные гомотопии. Если по методу сплайнов[1] соединить вершины ДВ (красные точки на Рисунке 2), полученный путь будет удовлетворять критерию минимальной кривизны траектории.

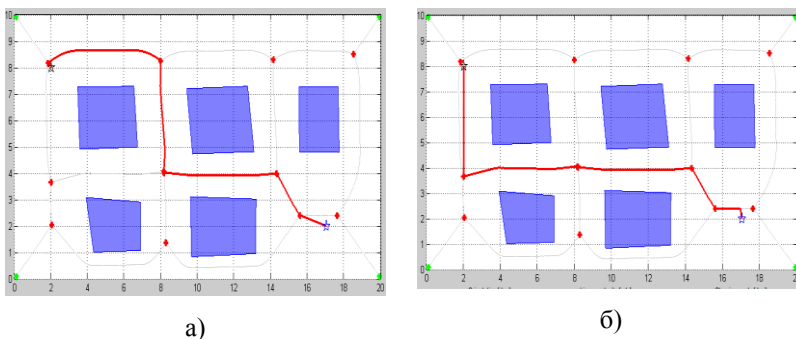


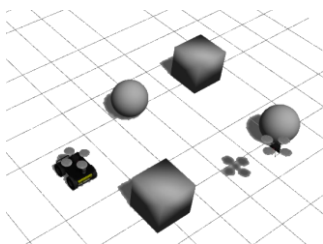
Рисунок 3 – Критерии расстояния  $P$  и время прямой видимости ВПР а)  $P=100$ , ВПР= 0; б)  $P=0$ , ВПР= 100

При расчетах сначала определяются траектории в различных гомотопиях, удовлетворяющие 100% значениям критериев. Затем, в зависимости от процентного вклада каждого критерия, вычисляется путь.

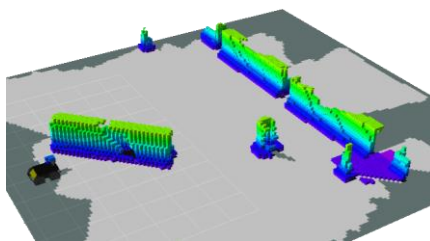
#### 4 Моделирование группового взаимодействия роботов в среде ROS\Gazebo

Для тестирования алгоритма проведено моделирование совместного исследования пространства и построения карты при помощи группы БПЛА с дальнейшим построением маршрута для БНР типа Husky в среде ROS Indigo и симуляторе Gazebo 2.2. Список пакетов ROS, использованных для моделирования и симуляции, включает пакеты [14]: *husky\_simulator*, *husky\_navigation*, *gmapper*, *hector\_quadrotor*, *octomap*, *map\_server*, *tf*, *voronoi\_planner* и средство визуализации *rviz*.

Для моделирования квадрокоптеров использовался модуль *hector\_quadrotor*. БПЛА и БНР используют Unified Robot Description Format (URDF) для описания физических и механических свойств модели. В качестве основного сенсора картографирования использовался RGBD-сенсор Kinect. Пример совместного расположения группы роботов, состоящей из одного БНР и двух БПЛА-квадрокоптеров, в смоделированном мире с простыми препятствиями показан на Рисунке 4а.



а)



б)

Рисунок 4 – а) Симуляция в Gazebo 2.2 БНР и 2-х БПЛА, б) Октокарта, построенная двумя БПЛА, следующими по меандру вперед от места стоянки БНР; БНР расположен по центру на левом крае карты

В целях избегания столкновений, в начальный момент времени БПЛА были расположены на безопасном удалении друг от друга, позволяющим перекрывать области видимости сенсоров Kinect друг друга. Для следования выбрана траектория-меандр [15]. Аналогичные траектории используются, например, при подводной съемке [16]. Пример октокарты, построенной таким образом, изображен на Рисунке 4б.

Ключевым фактором успешного построения октокарты является точная локализация каждого робота и передача правильной матрицы трансформации в общее дерево трансформаций (пакет *tf*). Локализация БПЛА использовала информацию симулятора Gazebo об истинном положении аппарата - так называемая *ground truth* локализация. Этот подход в дальнейшем будет заменён на локализацию по сенсорам БПЛА. Для решения задачи планирования маршрута использовался представленный в выше алгоритм на основе ДВ. На Рисунке 5а показана построенная ДВ при максимальном разрешении воксела в  $10\text{ см}^3$ .

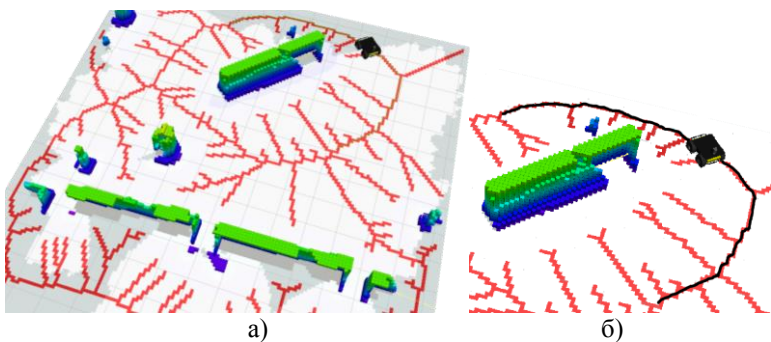


Рисунок 5. а) Робот Husky (правый верхний угол) на построенной двумя БПЛА карте б) БНР следует по глобальному маршруту (показан черным цветом на увеличенной карте с рисунка 5а)

Разрешение карты важно, так как при высоком разрешении существенно увеличивается время, необходимое на расчет ДВ и построение маршрута движения уже с использованием ребер и узлов диаграммы. Однако, при разрешении карты в  $10 \text{ см}^3$ , планировщик справляется со своей задачей за время менее 1 секунды для площадей порядка сотен квадратных метров. Пример глобального маршрута движения БНР показан на Рисунке 5б черной линией.

### **Заключение**

Важным результатом данной работы является создание алгоритма планирования пути, учитывающего изменяемые в реальном времени параметры оптимизации. Метод интегрирует подходы глобального и локального планирования маршрутов, оптимизируя рассчитываемые траектории мобильного робота в любой, подходящей по критериям оптимизации, гомотопии. На стадии глобального планирования строится предварительный маршрут движения, а затем на стадии локального планирования он динамически корректируется в режиме реального времени путем изменения весовых функций различных параметров оптимизации. Разработанный алгоритм демонстрирует быструю и робастную подстройку к динамически меняющейся среде, обеспечивая эффективную маршрутизацию мобильных роботов. Программная реализация алгоритма осуществлена в среде ROS с использованием симулятора Gazebo. Нами был создан симулятор, позволяющий моделировать различные условия местности и осуществлять её картографирование с воздуха при помощи группы БПЛА.

В дальнейшем, помимо усовершенствования модели БПЛА и использования распределенной компьютерной системы, нами планируется расширить алгоритмы картографирования и поиска маршрута для возможности их использования в динамической среде.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Magid E., Keren, D., Rivlin, E., Yavneh, I. Spline-based robot navigation // IEEE/RSJ IROS, 2006. – IEEE, 2006. – С. 2296-2301.
2. Siméon T., Laumond J. P., Nissoux C. Visibility-based probabilistic roadmaps for motion planning //Advanced Robotics. – 2000. – Т. 14. – №. 6. – С. 477-493.
3. Афанасьев И., Сагитов, А., Данилов, И., Магид Е. Навигация гетерогенной группы роботов (БПЛА и БНР) через лабиринт в 3D симуляторе Gazebo методом вероятностной дорожной карты //Второй Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта»:Труды семинара.–Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2015.–140 с. – 2015. – С. 18.
4. Choset H. M. Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation. – MIT press, 2005.
5. Lau B., Sprunk C., Burgard W. Efficient grid-based spatial representations for robot navigation in dynamic environments //Robotics and Autonomous Systems. – 2013. – Т. 61. – №. 10. – С. 1116-1130.
6. Kamon I. and Rivlin E. A new range-sensor based globally convergent navigation algorithm for mobile robots // Int. J. of Robotics Research, 1997
7. Magid E., Rivlin E. CAUTIOUSBUG: A competitive algorithm for sensory-based robot navigation // IEEE/RSJ IROS, 2004. – IEEE, 2004. – Т. 3. – С. 2757-2762.
8. Lei Tang, Songyi Dian and Gangxu Gu and Kunli Zhou A novel potential field method for obstacle avoidance and path planning of mobile robot // Computer Science and Information Technology, 2010.

9. Cheng P. Y., Chen P. J. Navigation of mobile robot by using D++ algorithm // Intelligent Service Robotics. – 2012. – Т. 5. – №. 4. – С. 229-243.

10. Likhachev M. and Koenig S. D\* lite // Eighteenth national conf. on Artificial intelligence, 2002.

11. Gonzalez R., Mahulea C. and Kloetzer M. A Matlab-based Interactive Simulator for Teaching Mobile Robotics // IEEE Int. Conf. on Autom. Science and Engineering, 2015.

12. Lau B., Sprunk C., Burgard W. Improved updating of Euclidean distance maps and Voronoi diagrams // IEEE/RSJ IROS. – IEEE, 2010. – С. 281-286.

13. Р.О. Лавренов, И.М. Афанасьев, Е.А. Магид, Планирование маршрута для беспилотного наземного робота с учетом множества критериев оптимизации // III Всероссийский научно-практический семинар "Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта", 2016 – С. 10-20.

14. А.Р. Габдуллин, А.К. Буйвал, Р.О. Лавренов, Е.А. Магид, ROS-моделирование взаимодействия БПЛА и наземного беспилотного робота для решения задачи планирования маршрута в Статической среде, III Всероссийский научно-практический семинар "Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта", стр. 21-30.

15. Galceran, E., and Carreras, M. A survey on coverage path planning for robotics // Robotics and Autonomous Systems 61, no. 12, С.1258-1276, 2013.

16. Багницкий А. В., Инзарцев А. В. Автоматизация подготовки миссии для автономного необитаемого подводного аппарата в задачах обследования акваторий //Подводные исследования и робототехника. – 2010. – №. 2. – С. 10.