

На правах рукописи



**Швец Евгений Александрович**

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ КАРТИРОВАНИЯ И  
ПАТРУЛИРОВАНИЯ КОЛЛЕКТИВОМ  
БЕСПИЛОТНЫХ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ,  
ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ И  
ЭХОЛОКАЦИЮ**

Специальность 05.13.18 —  
«Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ»

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва — 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
**Николаев Дмитрий Петрович**

Официальные оппоненты: **Чуличков Алексей Иванович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»,  
профессор кафедры компьютерных методов в физике физического факультета

**Гильмутдинов Марат Равилевич**,  
кандидат технических наук,  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Институт информационных систем и защиты информации,  
доцент кафедры инфокоммуникационных систем

Ведущая организация: ФГАУО ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2016 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.077.05 на базе Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича по адресу: 127051, г. Москва, Большой Каретный переулок, д.19 стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИППИ РАН и на сайте <http://iitp.ru/>.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2016 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 002.077.05, д. ф.м. н., доцент

Цитович И. И.

## Общая характеристика работы

**Актуальность.** В настоящее время автономные наземные и летательные аппараты (роботы) широко используются для различных задач, которые традиционно решались с помощью человеческих ресурсов: разведки, построения карты местности, патрулирования, видео- и фото- съемки, доставки или переноса грузов, в том числе в сценариях, где работа человека может представлять опасность (шахты, спасательные операции т.д.).

Для решения описанных выше задач роботы должны эффективно решать множество более простых подзадач: строить карту и определять собственное положение на территории, собирать и обрабатывать информацию с использованием технического зрения и эхолокации и выбирать маршруты, при движении по которым собирается необходимая в данный момент информация. Ранее разработка этих алгоритмов осуществлялась для случая одного робота.

В настоящее время становится популярным использование коллектива роботов для исследования территории, поскольку использование нескольких роботов позволяет повысить скорость исследования. Однако распределенное картирование, организация движения и другие задачи, возникающие при использовании нескольких роботов, исследованы заметно хуже, чем их аналоги для случая одного робота. Также для эффективного коллективного функционирования необходимо предложить алгоритмы, управляющие коллективным движением и регламентирующие обмен и обработку информации коллективом роботов.

Неотъемлемой частью задачи исследования территории является картирование территории. В современной робототехнике задачи картирования и локализации робота тесно связаны и обычно решаются вместе в рамках задачи одновременных локализации и картирования (англ. SLAM). Задача SLAM для коллектива роботов исследована заметно хуже, чем для случая одного робота.

Информация, которую собирает робот, зависит от маршрута его движения, поскольку сенсоры робота имеют ограниченную дальность. Для эффективного использования коллектива роботов необходимы алгоритмы движения, отличные от алгоритмов, используемых при применении одного робота.

Большинство существующих работ рассматривают задачу исследования статической территории – то есть территории, где ориентиры, используемые роботами для локализации, остаются актуальными в течение всего времени ис-

следования. В реальном мире в большинстве сценариев территория является динамической – то есть изменяется так, что за время картирования накапливаются изменения, достаточные для того, чтобы алгоритмы перестали работать корректно. Достаточно легкой задачей считается фильтрация быстро движущихся объектов при построении карты; обнаружить медленно движущийся объект – более сложная задача, и очень мало работ посвящено этой проблеме.

Другой проблемой, слабо освещенной в литературе, является продолжительная работа в условиях ограниченности объема памяти роботов. В случае, если исследование длится достаточно долго, то объем первичных данных, собираемых роботом, превысит любой заданный объем памяти.

Таким образом, задача построения моделей для исследования меняющейся местности коллективом роботов с ограниченным объемом памяти является актуальной.

**Степень разработанности темы.** В литературе существуют решения проблем картирования коллективом роботов, длительного исследования местности и работы на меняющейся территории. Стоит отметить работы зарубежных ученых С.Труна, Г.Сухатме, Д.Вульфа, М.Фингсторна. Однако эти работы не решают все проблемы согласованно. Проблемы коллективного патрулирования и картирования меняющейся территории тесно связаны, но редко рассматриваются вместе; кроме того, внимание не уделяется обеспечению длительного функционирования системы при ограниченном объеме памяти роботов. Подавляющее большинство алгоритмов патрулирования предназначены для помещений, а не для открытой территории, и не рассматривают возможность изменения территории. Работ, рассматривающих все описанные проблемы в комплексе, найдено не было.

**Целью** данной работы является создание математических моделей и необходимой алгоритмической базы программного обеспечения для повышения эффективности сбора информации коллективом роботов с ограниченным объемом памяти.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработана архитектура системы группового исследования территории методами одновременных локализации и картирования (SLAM), пригодная для работы на меняющейся территории в течение неограниченного промежутка времени.

2. Разработана среда имитационного моделирования коллективного исследования территории для испытания алгоритмов патрулирования, оценки и сравнения их эффективности.
3. Построена математическая модель и разработаны алгоритмы нерегулярного патрулирования для коллектива роботов без единого центра управления с запретом на обмен информацией о планируемых действиях с использованием метода потенциалов.
4. Разработана система тестирования и визуализации алгоритмов построения карты проходимости с использованием имитационной модели показаний сонаров.
5. Разработан численный метод построения карты проходимости в реальном времени на основе показаний сонаров и проведено сравнение точности восстанавливаемых карт с традиционными методами построения карты реального времени.

**Научная новизна.** Разработана модель сжатия, обработки и обмена поступающей с сенсоров информации, которая позволяет использовать существующие методы локализации и картирования для исследования динамической территории коллективом роботов.

Разработанная модель и алгоритмы патрулирования, основанные на методе потенциалов, позволяют обеспечить автономное непредсказуемое движение роботов без обмена планами о будущем движении при решении задачи патрулирования открытой территории.

Предложен метод обработки информации для картографирования, который позволил использовать прямую модель сонара (forward sonar model) для работы в режиме реального времени.

**Практическая значимость.** Архитектура системы для хранения, обработки и обмена данными позволяет увеличить длительность исследования местности коллективом роботов и повысить эффективность сбора информации. Разработанная среда имитационного моделирования для визуализации, отладки и измерения численных характеристик алгоритмов патрулирования может быть использована чтобы сэкономить время и средства при разработке и тестировании новых алгоритмов патрулирования.

Комплекс программ для имитационного моделирования использован в ИППИ РАН в рамках работ по проекту РНФ.

Алгоритм построения карты проходимости успешно внедрен в проекте “Стая”. Алгоритм превосходит описанные в литературе аналоги по точности построения в классе алгоритмов реального времени для случая территории с препятствиями малого размера и узкими проходами. Алгоритм позволяет обнаруживать проходы, в 1.3 раза более узкие, чем традиционные алгоритмы, а также существенно увеличить точность определения ширины проходов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Предложенная архитектура системы хранения и обмена данными в коллективе роботов обеспечивает поддержание актуальной карты меняющейся местности при ограниченной памяти роботов.
2. Разработанный комплекс программ для имитационного моделирования позволяет исследовать, сравнивать и визуализировать алгоритмы коллективного патрулирования с учетом возможных разрывов связи между роботами.
3. Разработанный алгоритм коллективного стохастического патрулирования пригоден для работы на открытой местности и обеспечивает непредсказуемое поведение роботов при отсутствии центра управления и не требует передачи по внешнему каналу команд и указаний о планируемых действиях роботов.
4. Численный метод построения карты проходимости на основе показаний сонаров способен работать в режиме реального времени, существенно увеличить точность определения ширины проходов и обнаруживать проходы в 1.3 раза более узкие, чем традиционные алгоритмы в ряде сценариев.

**Достоверность** результатов, полученных для задачи патрулирования, обеспечивается многократно повторенным имитационным моделированием. Архитектура обработки, обмена и хранения данных построена на основе анализе практик и обобщении опыта опубликованных работ других авторов. Алгоритмы модели, отвечающие за ассоциирование данных, были имплементированы и протестированы на реальных данных. Алгоритмы построения карт проходимости на основе показаний сонаров имплементированы и протестированы на реальных и синтетических данных. Полученные результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на двух международных конференциях: 29th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2015, Albena, Bulgaria) и Eighth International Conference on Machine Vision (ICMV 2015, Barcelona) и были доложены на научном семинаре Лаборатории 11 Института Проблем Передачи Информации.

**Личный вклад.** Все результаты диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Автором также самостоятельно проведены вычислительные эксперименты на синтезированных и реальных данных. Постановка задач и обсуждение результатов проводилось совместно с научным руководителем, имплементация алгоритмов картирования на основе показаний сонаров осуществлена под руководством диссертанта стажером-исследователем лаборатории 11 ИППИ РАН Шепелевым Д.А.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 научных публикациях, 4 из которых изданы в рецензируемых журналах, 2 из которых рекомендованы ВАК [1,2], 2 — в трудах конференций, индексируемых Web of Science[3,4].

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии и приложения, содержит 33 рисунка и 6 таблиц. Общий объем диссертации составляет 139 страниц. Библиография включает 143 наименования на 17 страницах.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируются цели и ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** состоит из четырех разделов. В разделе 1.1 описана традиционная схема функционирования робота (см. рис. 1) и описываются модели получения цифровых данных на основе показаний сенсоров.

Пункт 1.2.1 рассматривает современные алгоритмы картирования и историю их развития с 1980-ых годов и основные используемые представления карт.

В пункте 1.2.2 рассматривается процедура “ассоциирования данных”, позволяющая решить проблему неограниченного роста ошибки локализации



Рис. 1. Структурная схема работы робота

робота при использовании инерциальной навигационной системы. Для этого соотносятся данные визуальных сенсоров, полученные в разные моменты времени и определяется, какие из разнесенных по времени измерений являются результатами наблюдения за одним и тем же объектом. Также в пункте 1.2.2 осуществляется обзор наиболее часто используемых методов для решения задачи одновременных локализации и картирования (ОЛИК, в англоязычной литературе - SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)): фильтров Калмана, Рао–Блэквелла, и методов на основе EM- и графовой оптимизации.

Раздел 1.3 посвящен задаче патрулирования. В пункте 1.3.1 описываются критерии для измерения эффективности подобных алгоритмов. Для этого вводится понятие “тумана войны”  $TB(X)$  в точке  $X$  территории – время, прошедшее с момента последнего наблюдения за точкой  $X$  территории каким-либо из роботов. Пусть  $MTB(t)$  – максимальное значение  $TB(X)$  по всем точкам территории в момент времени  $t$ . Тогда критерием является среднее по времени значение  $MTB(t)$  за все время патрулирования.

Пункт 1.3.2 посвящен существующим алгоритмам патрулирования. Большинство этих алгоритмов предназначены для работы внутри помещений, и плохо подходят для открытых пространств. Также общим недостатком этих методов является выбор маршрутов движения роботов до начала патрулирования и предсказуемость (регулярность) поведения роботов, неустойчивость к



выходу из строя одного или более роботов и к изменению территории. Вместо подобных методов предлагается использовать методы, которые осуществляют динамическое принятие решения о том, куда будут двигаться роботы, в каждый момент времени. Подобные методы включают методы на основе машинного обучения с подкреплением, методы “аукционов”, метод потенциалов. На основе результатов сравнения масштабируемости и гибкости в данной работе выбирается метод потенциалов.

В разделе 1.4 рассматриваются существующие алгоритмы построения карты проходимости на основе показаний сонаров. Сонары широко используются в робототехнике из-за своей дешевизны, но из-за зашумленности показаний сонаров и отсутствия углового разрешения построение карты проходимости на их основе достаточно сложно. Карта проходимости обычно ищется в виде сетки, ячейки которой содержат оценку вероятности (или уверенности) того, что участок территории, соответствующий ячейке, содержит препятствие.

В пункте 1.4.2 вводятся понятия прямой и обратной модели сонаров. Обратная модель сонара опирается на распределением  $p(r|z)$  реального расстояния  $r$  до препятствия в зависимости от показания сонара  $z$ . Такая модель называется обратной, поскольку она обратна процессу снятия показаний – расстояние до объекта в такой модели определяется показанием сонара, а на самом деле показание сонара определяется расстоянием до препятствия.

Методы, использующие обратную модель сонара, не способны аккуратно моделировать ни вероятностную природу показаний сенсоров, ни возможность получения отражения когда препятствие закрывает луч сонара лишь частично. Для учета этих явлений используется прямая модель сонара, записываемая в виде распределения  $p(z|M)$  – оценки распределения вероятности получить показание сонара  $z$ , если известна карта территории  $M$ . Подобные методы осуществляют поиск в пространстве карт  $M$ . Общий недостаток работ, использующих прямую модель – вычислительная сложность алгоритмов, и сложность имплементации для работы в режиме реального времени.

**Во второй главе** описывается разработанная архитектура системы, позволяющая решить задачу длительного исследования динамического окружения роботами с ограниченным объемом памяти. Схема верхнего уровня архитектуры приведена на рис. 2. Основные проблемы, возникающие при решении данной задачи – это слияние карт, полученных различными роботами, органи-



Рис. 2. Верхний уровень предложенной архитектуры для задачи коллективного исследования динамической территории

зация эффективного обмена данными, выбор релевантной информации среди собранной и поддержание объема хранимых данных ниже заданного ограничения, выбор ориентиров, по которым роботы будут ориентироваться и вычислять взаимные положения, а также координация их движения. Предложенная архитектура позволяет согласованно решить эти задачи.

Для хранения данных в системе предлагается использовать следующие структуры данных: позы, ориентиры, замыкающие ребра, ребра невизуальной одометрии. Позы содержат информацию об ориентирах и карте проходимости около определенной точки территории. Ориентиры – это характерные объекты или точки на территории, используемые для оценки взаимного расположения различных поз роботов за счет ассоциирования данных. Замыкающие (визуальные) ребра – это сохраненный результат ассоциирования данных. Именно замыкающие ребра позволяют ограничить величину постоянно накапливаемой ошибки локализации (в отсутствие навигационного поля).

Ребра невизуальной одометрии содержат информацию о взаимном расположении двух поз, полученную от колесных датчиков или инерциальной навигационной системы. На длительных промежутках времени подобная информация не может быть проинтегрирована для получения позиции робота, потому что ошибка в измерениях постоянно накапливается и неограниченно растет.

Однако невизуальные ребра позволяют обнаруживать некорректные ассоциирования данных, а также могут быть использованы, когда необходимых замыкающих ребер нет.

Хранилище данных каждого из роботов состоит из хранилища локальных данных (ХЛД), хранилища полученных данных (ХПД) и хранилища замыкающих ребер (ХЗР). Разделение хранилища данных на части необходимо для решения проблемы двойного учета – ситуации, когда в результате обмена информацией какой-либо робот производит учет одного измерения более одного раза. Также каждый робот хранит полную карту окружения, которая собирается на основе всех имеющихся данных и периодически обновляется в процессе картирования, а также априорную карту, которая одинакова для всех роботов и остается неизменной в процессе картирования – она предоставляет роботам общую глобальную систему координат. Такая априорная карта не должна обладать высокой точностью, поскольку окружение постоянно меняется.

Все измерения, снятые роботом самостоятельно, в том числе невизуальные ребра одометрии, хранятся в ХЛД и представлены в виде графа: позы являются вершинами, а ребра одометрии – ребрами. Все измерения, снятые другими роботами и полученные по сети, хранятся в ХПД, разбитом на слои. Данные попадают в различные слои в зависимости от того, каким роботом они изначально получены. Каждый слой ХПД имеет такую же графовую структуру, как и ХЛД. Разделение ХЛД и ХПД позволяет сохранять информацию об источнике каждого из измерений и исключить проблему двойного учета.

В разделе 2.3 описываются следующие алгоритмы: обработка новой позы, ассоциирование визуальных данных (с использованием алгоритма RANSAC), способ быстрого сопоставления поз с использованием иерархической кластеризации для быстрого нахождения всех ассоциирований данных между новой и всеми другими позами в хранилище данных робота. Вводятся параметры надежности и актуальности, позволяющие определять ориентиры, которые активно используются для корректных ассоциирований данных, и удалять неиспользуемые ориентиры, таким образом контролируя объем и актуальность данных, хранимых роботами.

В разделе 2.4 описываются алгоритм для выбора информации и способ ее структурирования для передачи в случае, когда пропускная способность сети недостаточна для передачи всех имеющихся данных.

В третьей главе рассматривается математическая модель принятия решений о движении робота для задачи патрулирования на основе метода потенциалов, строится имитационная модель, и с ее использованием разрабатываются и исследуются алгоритмы коллективного патрулирования.

В данной работе идет поиск решения, позволяющего сделать движение патрулирующих роботов непредсказуемым для стороннего наблюдателя. Для этого используется метод потенциалов, заключающийся в том, что каждая точка территории оказывает на робота виртуальную силу, “тянущую” его в направлении пути, который ведет от робота к этой точке. Модуль силы увеличивается с ростом значения тумана войны в этой точке и уменьшается с увеличением длины пути, который ведет от робота к точке. Робот принимает решение о направлении движения в зависимости от того, какие силы на него действуют – это может быть движение либо в направлении векторной суммы всех сил, либо в направлении моды угловой гистограммы направленности действующих сил.

Формально, алгоритм состоит из следующих подалгоритмов:

1. Нахождение пути  $P(R,T)$  от робота до каждой точки территории.
2. Расчет силы притяжения  $F(R,T)$ , с которой каждая из точек действует на робота.
3. Выбор желаемого направления движения робота на основе анализа всех сил, которые на него действуют.
4. Корректировка полученного направления движения для избежания столкновений с препятствиями и другими роботами.

В работе построение алгоритма патрулирования ведется поэтапно, рассматриваются различные карты патрулирования и типы роботов. На первом этапе исследования рассматривается патрулирование территории без препятствий голономными роботами (то есть роботами, способными мгновенно менять направление и скорость движения) и определяется оптимальная функция нахождения модуля силы,  $F(R,T)$ . Отсутствие препятствий на территории позволяет исключить задачу нахождения пути на этом этапе построения алгоритма. Ищется функция  $F$  вида:

$$F(R,T) = f(TB(T), MTB(t)) \cdot g(L(R,T)),$$

здесь  $L$  – длина пути  $P$  от робота  $R$  до точки  $T$ . Рассматриваются различные комбинации функций и методом перебора выбирается следующая:

$$F(R,T) = e^{\alpha \cdot \frac{TB(T)}{MTB(t)}} \cdot e^{-\frac{L^2(R,T)}{\beta^2}}$$

Здесь  $\alpha$  и  $\beta$  – нормировочные коэффициенты для эффективного использования представления числа с плавающей точкой,  $l$  – коэффициент, отражающий характерный линейный размер территории. Длины  $l$  и  $L$  измеряются в дециметрах. Для большинства проведенных в данной работе экспериментов выбраны следующие значения параметров:  $\alpha = 40$ ,  $\beta = 65$ ,  $l = 800$  дм.

На втором этапе исследования рассматривается патрулирование территории с препятствиями голономными роботами и выбирается способа нахождения путей от робота до точек территории. В работе рассматриваются два подобных метода: метод “регионов” и метод “волны”. Метод регионов заключается в разбиении территории на выпуклые участки – “регионы” и нахождении пути в виде ломаной линии, прямые участки которой проходят через регионы. Алгоритм волны заключается в представлении разбиении карты на участки  $1 \times 1$  дм и представлении в виде графа, где каждой вершине соответствует один такой участок. Соседние проходимые участки соединены ребрами. Вес ребер между вершинами, соседствующими по горизонтали или вертикали, равен 1, а соседствующими по диагонали –  $\sqrt{2}$ . Поиск маршрута из точки  $R$  до точки  $T$  производится на указанном графе методом Ли (поиска в ширину).

Результаты имитационного моделирования показывают, что с точки зрения эффективности патрулирования на постоянной, не меняющейся территории метод регионов является предпочтительным, даже при достаточно грубом разбиении территории. Графики на рисунке 4 иллюстрируют эту закономерность. Однако разбиение территории на регионы и составление карты для более сложных территорий является трудозатратной задачей. Кроме того, метод регионов не может быть непосредственно применен при патрулировании меняющейся территории. Далее в работе используется метод волны.

В разделе 3.4 рассматриваются два способа выбора направления движения робота в зависимости от действующих на него сил: методом векторной суммы (робот движется в направлении векторной суммы действующих на него сил) и методом моды (робот движется в направлении моды угловой гистограммы направленности действующих сил. Как показали эксперименты, относитель-

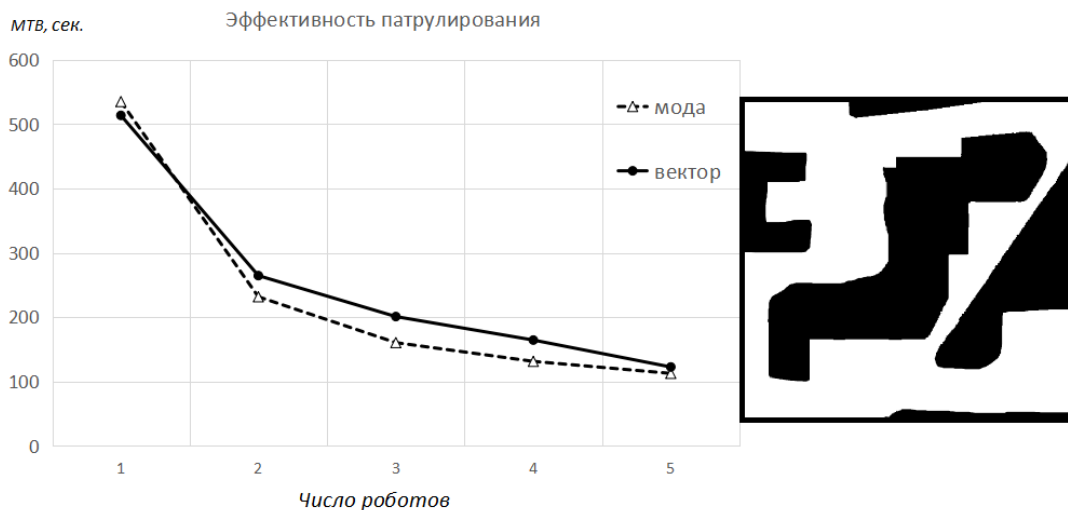


Рис. 3. Сравнение различных методов выбора направления движения и карта используемой территории

ная эффективность этих методов зависит от количества препятствий на территории патрулирования. Результаты двух серий экспериментов приведены на рисунках 3 и 4. Результаты демонстрируют, что выбор направления движения методом векторной суммы лучше подходит для территорий с малым числом препятствий.

В разделе 3.5 рассматриваются роботы, обладающие минимальным радиусом поворота, неспособные мгновенно менять направление и скорость движения, и следовательно не всегда способные выполнить маневр, который от них требуется в соответствии с разработанным ранее алгоритмом. Потому алгоритм выбора направления движения модифицируется: каждый робот вместо того, чтобы двигаться в задаваемом методом потенциалов направлении поворачивает колеса таким образом, чтобы как можно скорее ориентироваться по выбранному направлению.

Для обеспечения более плавного движения роботов и уменьшения времени, проводимого в маневрах для объезда препятствий, в разделе 3.6 предлагаются два метода.

При использовании первого метода (“метода уточнения направления”) стандартный алгоритм находит локальную цель движения  $Z$ . Затем в квадратном участке территории  $K$  со стороной  $r$  и центром в точке  $Z$  находится новая

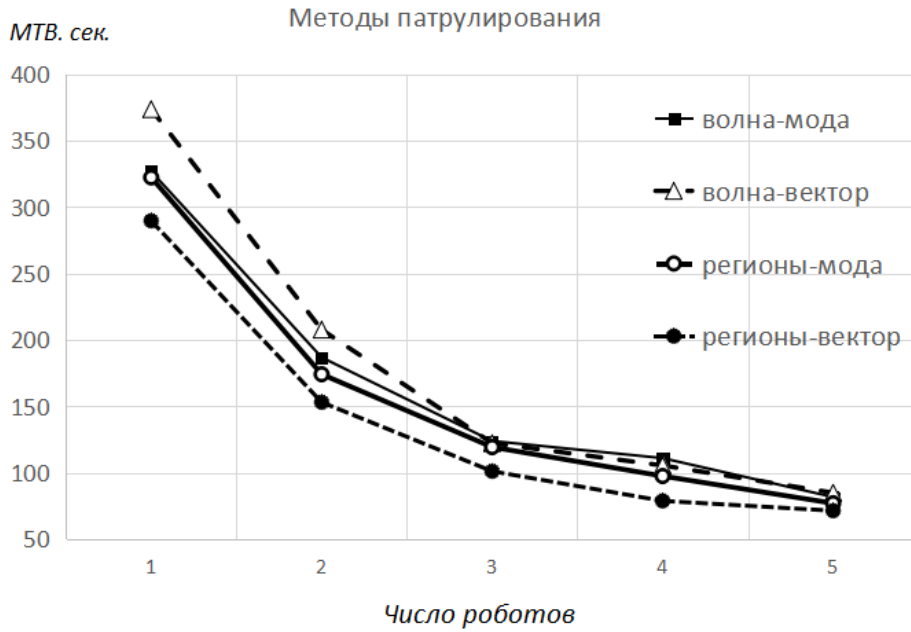


Рис. 4. Сравнение различных методов нахождения пути и выбора направления движения для карты без препятствий

цель движения, максимально удаленная от близких препятствий:

$$(x, y)_{new} = \operatorname{argmin}_{(x, y) \in K} \sum_{\substack{\tilde{x} \in [x-l, x+l]; \\ \tilde{y} \in [y-l, y+l]}} \frac{M(\tilde{x}, \tilde{y})}{(x - \tilde{x})^2 + (y - \tilde{y})^2},$$

где  $M(x, y)$  равно 1, если точка  $(x, y)$  является непроходимой, и 0 иначе.

Таким образом, глобально робот движется в необходимом направлении, но локально выбирается траектория, наиболее удаленная от препятствий. На основе численных экспериментов выбраны следующие параметры:  $l = 10$  м,  $R_G = 2.5$  м,  $r = 2$  м. Как видно из графика на рис. 5, метод позволяет улучшить значение  $MTB$  примерно на 10%, а также уменьшить долю времени, проводимого роботом в маневрировании в “тупиках” ( $ДВТ$ , подробнее описано в диссертации).

Второй метод представляет собой модификацию алгоритма выбора направления методом моды: и заключается в уменьшении значений угловой гистограммы сил в направлениях, в которых располагаются препятствия. Данный метод уступает по эффективности методу уточнения направления, результаты экспериментов и численные параметры приведены в диссертации.

В четвертой главе описываются два разработанных метода построения карты проходимости в режиме реального времени на основе показаний

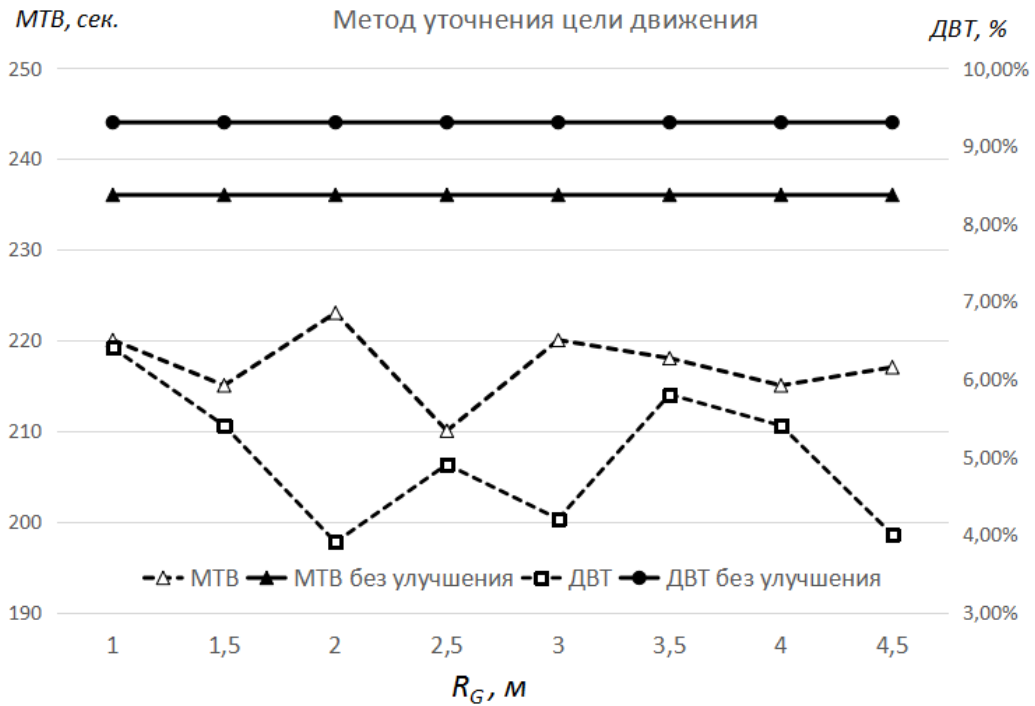


Рис. 5. Влияние уточнения направления движения

сонаров. Предложенные алгоритмы используют прямую модель сонара (англ. forward model). Использование прямой модели позволяет строить более точные карты, но значительно увеличивает вычислительную сложность алгоритма. Прямая модель впервые описана в работах С.Труна.

В разделе 4.2 вводится понятие невязки – численной оценки того, насколько показание сонара соотносится с картой и описывается предлагаемая нами прямая модель. В разделе 4.5 описывается метод построения карты проходимости с использованием градиентного спуска в пространстве карт проходимости (минимизируется сумма  $S$  невязок и слагаемых регуляризации):

$$S = \sum_{z \in Z} \left( P_{free} \left( \sum_{x \in \Omega_{free}(z)} M(x) \right) + P_{occ} \left( \sum_{x \in \Omega_{occ}(z)} M(x) \right) \right) + \sum_{x \in \Omega_M} R(M(x))$$

здесь  $\Omega_M$  – множество ячеек карты,  $M(x)$  – значение проходимости ячейки  $x$ ,  $Z$  – множество показаний сонаров  $z$ ,  $\Omega_{free}(z)$  и  $\Omega_{occ}(z)$  – множества ячеек, которые попали в луч сонара при измерении  $z$ , и которые, согласно этому показанию, не могут ( $\Omega_{free}(z)$ ) и могут содержать ( $\Omega_{occ}(z)$ ) препятствия. Слагаемые  $P_{free}^j$  и  $P_{occ}^j$  – это невязки, отвечающие за соответствие между показаниями сонара и текущей картой проходимости – подробности описаны в полном тексте диссертации. Слагаемое  $R(M(x))$  отвечает за регуляризацию.



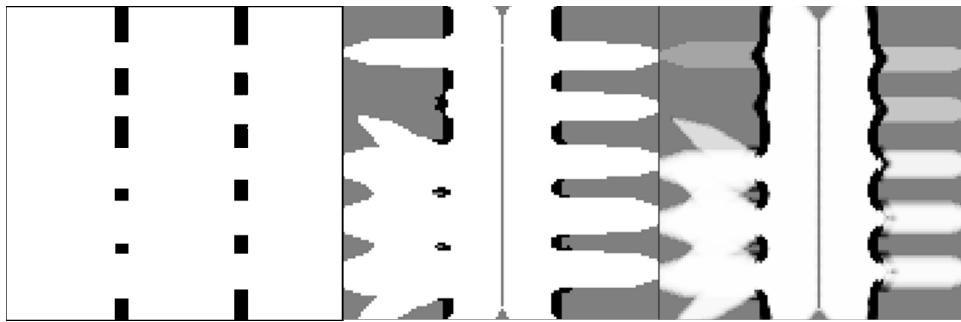


Рис. 6. Карта с проходами различных размеров (слева), восстановленные карты: предложенным методом(в центре), традиционным методом (справа)

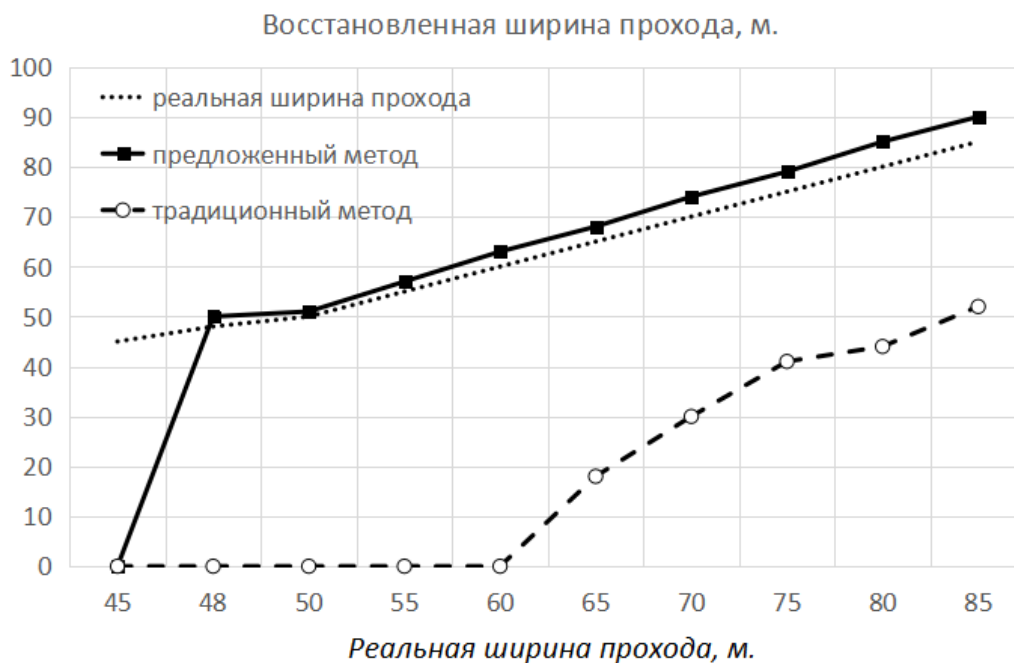


Рис. 7. Зависимость восстановленной ширины прохода от реальной

Результаты построения карты предложенным методом приведены на рис. 6. На территории расставлены препятствия на различных расстояниях друг от друга. На графике 7 приведены зависимости ширины восстановленного прохода в зависимости от реальной ширины прохода. Как следует из графика, предложенный метод позволяет обнаружить более точный размер проходов, а минимальная ширина прохода, обнаруживаемого предложенным методом, примерно на 30 % меньше по сравнению с традиционным методом.

В разделе 4.4 описан метод построения карты, использующий рандомизированный поиск в пространстве бинарных карт проходимости. Для этого используется прямая модель сонара С. Труна, описанная в разделе 4.3 и способная моделировать выбросовые показания сонара. Шаг рандомизированного алгоритма заключается в (i) инвертировании значения в случайной ячейке кар-

ты проходимости и (ii) принятия решения о сохранении нового значения или возврата ячейки в начальное состояние. Для принятия решения на втором шаге алгоритма используется выражение  $\Phi = \phi_{sonars} + \phi_{occ} + \phi_{borders}$ . Здесь слагаемое  $\phi_{sonars}$  отвечает за соответствие показаний сонаров и текущей итерации карты проходимости, а слагаемые  $\phi_{occ}$  и  $\phi_{borders}$  являются слагаемыми регуляризации.

Из двух рассмотренных методов метод градиентного спуска показал лучшие результаты. Оба метода способны работать в режиме реального времени (в отличие от существующих методов на основе прямой модели) и имеют преимущество в качестве обнаружения узких проходов в сравнении с методами, основанными на обратной модели сонара.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработана архитектура для обмена данными, хранения и обработки поступающей информации, а также оценки ее надежности и актуальности для системы продолжительного картирования меняющейся местности коллективом роботов.
2. Разработан комплекс программ имитационного моделирования для исследования и сравнения алгоритмов коллективного патрулирования.
3. Разработан и реализован алгоритм коллективного стохастического патрулирования, основанный на методе потенциалов, для которого получены численные результаты для некоторых типов территорий.
4. Разработано программное обеспечение для имитационного моделирования показаний сонаров на основе карт проходимости и система для тестирования алгоритмов построения карт проходимости.
5. Предложена детерминистическая прямая модель сонара (forward sonar model) для построения карт методом градиентного спуска в пространстве карт проходимости в режиме реального времени.
6. Предложен алгоритм построения карт проходимости на основе показаний сонаров, способный оперировать в режиме реального времени, обнаруживающий проходы в 1.3 раза меньшей ширины, чем традиционные алгоритмы и существенно увеличивающий точность определения ширины проходов.

### **Публикации по теме диссертации:**

1. Е. А. Швец. Зависимость эффективности коллективного стохастического патрулирования от связности и надежности беспроводной сети. Труды ИСА РАН 2016-66-1, Стр. 70-73.
2. Д. П. Николаев, Е. А. Швец, Д. А. Шепелев. Построение карты проходимости на основе показаний датчиков расстояния методом стохастического градиента. Труды ИСА РАН 2016-66-1, Стр. 64-69.
3. Shvets E., Nikolaev D.P. Complex approach to long-term multi-agent mapping in low dynamic environments // In Eighth International Conference on Machine Vision. International Society for Optics and Photonics. pp. 8752A-98752A
4. Shvets E. Stochastic multi-agent patrolling using social potential fields // In Proc. of 29th European Conf. on Modelling and Simulation. pp. 42-49.
5. Е.А. Швец, Д.А. Шепелев, Д.П. Николаев. Восстановление карты проходимости с использованием прямой модели сонаров методом градиентного спуска. Информационные процессы. Стр. 61-71