

На правах рукописи

ВОРОНОВ РОМАН ВЛАДИМИРОВИЧ

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ
СИСТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ
МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ВНУТРИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Петрозаводск – 2017

Диссертация выполнена на кафедре прикладной математики и кибернетики Петрозаводского государственного университета

Научный консультант: **Рогов Александр Александрович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Львович Яков Евсеевич**,
доктор технических наук, профессор, за-
ведующий кафедрой систем автоматизи-
рованного проектирования и информаци-
онных систем Воронежского государствен-
ного технического университета

Смирнов Николай Васильевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой мо-
делирования экономических систем
Санкт-Петербургского государственного
университета

Грабарник Павел Яковлевич,
доктор физико-математических наук, за-
ведующий лабораторией моделирования
экосистем Института физико-химических
и биологических проблем почвоведения
Российской академии наук

Ведущая организация: Санкт-Петербургский институт информа-
тики и автоматизации Российской акаде-
мии наук

Защита состоится 22 декабря 2017 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.190.03 в Петрозаводском государственном университете по адресу: 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Петрозаводского государственного университета и на сайте petrsu.ru.

Автореферат разослан "....." октября 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Е. А. Питухин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Задача определения местоположения мобильных объектов в зданиях и сооружениях, где невозможно использовать спутниковые системы навигации, актуальна для многих приложений, связанных, например, с безопасностью (шахты, станции метро, больницы), с отслеживанием нахождения и перемещения грузов (производство, перевозки, склады), с автоматическими системами (робототехника, пожаротушение) и т. д. В этом случае разрабатываются и применяются специальные системы определения местоположения, называемые системами внутреннего позиционирования (indoor positioning system), использующие локальные навигационные поля, особенностью которых является невозможность принятия сигналов от глобальных навигационных систем и ограничение на дальность распространения радиосигнала. Такие системы имеют иерархическую структуру управления, состоящую из размещенных на некоторой территории, связанных и комплексно взаимодействующих между собой подсистем: множества стационарных точек доступа (базовых станций, радионавигационных точек), множества разного типа датчиков, закрепленных на мобильном объекте и сервера с программами позиционирования. Для построения систем внутреннего позиционирования используются различные беспроводные технологии: WiFi, ZigBee, nanoLOC, UWB, Bluetooth и др. Одной из технологий внутреннего позиционирования является RealTrac.

При проектировании и установке систем внутреннего позиционирования необходимо решать следующие взаимосвязанные задачи: выбор топологической структуры системы; выбор комплекса программных и технических устройств, состоящего из точек доступа и датчиков мобильного объекта; выбор методов определения местоположения мобильных объектов; распределение выполняемых функций по узлам системы, учитывающее взаимосвязи в обработке информации. Как правило, имеются ограничения на количество используемых точек доступа, на их стоимость и связанную с ними инфраструктуру, требования к безопасности, ограничения на объемы передаваемой информации, оперативность, аппаратную надежность, вес, энергопотребление, загрузку. Системы внутреннего позиционирования требуют постоянной доработки и развития.

Качество работы систем определения местоположения зависит от

числа и мест размещения стационарных точек доступа, имеющих разные зоны покрытия радиосигналом. Различия в моделях и подходах, применяемых в глобальных навигационных системах и системах внутреннего позиционирования, основанных на беспроводных сетях, проявляются и при решении проблемы определения числа и мест размещения точек доступа.

В глобальных системах позиционирования для оценивания средней точности определения местоположения объектов используют геометрический фактор, зависящий от размещения спутников относительно приемника их сигналов. Минимальное значение геометрического фактора соответствует конфигурации радионавигационных точек, при заданном их количестве, для которой точность работы позиционных методов определения местоположения объектов будет оптимальной. Отличие систем внутреннего позиционирования состоит в том, что в них чаще применяют методы счисления пути и обзорно-сравнительные методы определения местоположения объектов, для которых также необходимы точки доступа беспроводной сети. Как правило отсутствует прямая видимость между объектом и точками доступа, характерно многолучевое распространение, ослабление и потери радиосигналов из-за препятствий. Следовательно, в системах внутреннего позиционирования неприменимы рекомендации, касающиеся мест размещения точек доступа, основанные только на минимизации геометрического фактора.

Отдельные результаты, связанные с решением задачи размещения точек доступа систем внутреннего позиционирования, представлены в работах Гимпилевича Ю. Б., Казаковцева Л., Савочкина Д. А., Baala O., Battiti R., Brunato M., Caminada A., Chang C. T. Chen Y., Chen W., Chobtrong T., Delai A., Fang S. H., Farkas K., Fondrevelle J., Francisco J. A., Gondran A., Gódor G., Günes E., Haid M., Huszák Á., Ji Y., Jia W., Kamil M., Kim T., Liao L., Lin T. N., Martin R. P., Russ J. A., Shin J., Tak S., Trappe W., Wang C. S., Wen Y., Xuan D., Zhang C., Zhang L. и др. В большинстве исследований сделан акцент на обеспечение максимального покрытия, в меньшей мере уделяется внимание точности определения местоположения. Во многих работах не учитывается случайный характер уровня сигнала.

Точность современных систем внутреннего позиционирования не всегда является достаточной для некоторых прикладных задач. Напри-

мер точность систем, применяющихся в шахтах, составляет от 20 до 100 метров. Важной задачей является повышение точности определения местоположения объектов до 4 – 5 метров, а в некоторых приложениях до 1 метра. Одним из способов решения этой задачи является определение оптимальных параметров системы, включая число и места размещения точек доступа, их калибровка в процессе эксплуатации, использование данных, поступающих из разных источников, в том числе от инерциального измерительного модуля.

Таким образом актуальна проблема разработки комплекса математических моделей, численных методов и программ, позволяющего решать задачи определения местоположения объектов внутри закрытых сооружений, задачи определения мест размещения точек доступа с учетом таких ограничений, как затраты на их установку и настройку, точности определения местоположения, безопасности, устойчивости системы. Развитие гибридных систем внутреннего позиционирования, в которых местоположение объекта определяется на основе обработки данных, получаемых из различных источников (датчиков движения – акселерометров и гироскопов, датчиков атмосферного давления, датчиков магнитного поля и т. д.) является актуальным направлением научных исследований.

Цель и задачи

Целью работы является совершенствование методов математического моделирования, численных методов и комплекса программ, предназначенных для проектирования и работы систем внутреннего позиционирования, позволяющих определять местоположение мобильных объектов с заданной точностью.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1. Предложить и исследовать методы математического моделирования систем внутреннего позиционирования, основанных на беспроводных сетях датчиков.
2. Разработать математические модели систем внутреннего позиционирования, в которых учитывается случайный характер распространения сигнала.
3. Для предложенного класса моделей сформулировать и исследовать

оптимизационную задачу определения мест размещения точек доступа системы определения местоположения.

4. Разработать численные методы решения задачи оптимального размещения точек доступа системы определения местоположения.
5. Разработать алгоритм динамического построения карт уровней сигналов для добавляемых точек доступа.
6. Разработать и усовершенствовать алгоритмы определения местоположения мобильного объекта, использующие данные, получаемые от дополнительных источников информации, в том числе от инерциального измерительного модуля.
7. Спроектировать, реализовать и протестировать комплекс программ, реализующих предложенные методы и алгоритмы систем внутреннего позиционирования и определения параметров их работы.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Предложен метод математического моделирования систем внутреннего позиционирования, отличающийся вариабельностью способов представления покрываемой территории и методов определения местоположения, предназначенный для решения задач определения параметров этих систем с учетом требований к точности, безопасности, надежности, устойчивости. В предложенных моделях предполагается использование измерений, поступающих от различного рода датчиков (точек доступа беспроводной сети, датчиков магнитного поля, датчиков атмосферного давления и т.д.), для каждого из которых используется уникальное разбиение на зоны и карта шаблонов измерений в этих зонах. Особенностью моделей является использование для каждой зоны вероятностных распределений всех возможных в ней комбинаций измерений.
2. Разработаны численные методы определения оптимальных мест размещения точек доступа системы внутреннего позиционирования. Под оптимальностью понимается требование размещения минимально возможного числа точек доступа, обеспечивающих определение местоположения объектов с установленной точностью, либо требование размещения заданного числа точек доступа, обеспечивающих

определение местоположения объектов с наилучшей точностью. Предложенные методы, в отличие от известных, позволяют определять оптимальную конфигурацию точек доступа системы внутреннего позиционирования, при условии применения метода счисления пути и обзорно-сравнительного метода определения местоположения объектов.

3. Предложена графовая модель, предназначенная для теоретического исследования алгоритмов размещения точек доступа системы внутреннего позиционирования. Показана связь между задачей размещения точек доступа и задачей определения разрешающего множества вершин графа. Минимально необходимому числу точек доступа соответствует метрическая размерность графа. Рассмотрена задача построения разрешающего множества с учетом отказов точек доступа. Найдены новые формулы для отказоустойчивой метрической размерности графа, равного сильному произведению двух простых цепей.
4. Предложено вероятностное обобщение задачи метрической размерности графа, отличающееся учетом случайного характера оценивания расстояний между вершинами графа. Графовая модель может быть использована для систем позиционирования в сооружениях, например, для зданий со множеством длинных коридоров или для шахт.
5. Разработан алгоритм динамического построения карт уровня сигналов добавляемой точки доступа системы внутреннего позиционирования, основанный на EM-методе, отличающийся использованием на M-шаге оценок вероятностей нахождения объектов в зонах помещения, вычисляемых методами позиционирования.
6. Предложены новые численные методы определения местоположения объектов, учитывающие дополнительную информацию, поступающую от инерциальных измерительных модулей. Данные методы могут применяться для оценки скрытого местоположения объектов в сооружениях со сложной структурой, например, в шахтах. Отличие от известных методов, применяемых в глобальных системах навигации, заключается в привязке наблюдаемой траектории дви-

жения объекта к плану сооружения, заданного в виде множества зон или графа, осуществляемой между моментами прохождения объекта точек с уставленными радионавигационными устройствами, позволяющими однозначно локализовать положение объекта. Предложенный подход может применяться в системах определения местоположения мобильных объектов на основе беспроводной сети датчиков, когда требуется одновременно определять местоположение большого числа устройств в режиме экономии эфира.

7. Разработан комплекс программ, имитирующий систему внутреннего позиционирования, позволяющий проводить вычислительные эксперименты на различных типах моделей покрываемых территорий и с разными алгоритмами определения местоположения и типами датчиков, отличающийся реализацией численных методов определения ее оптимальных параметров с учетом требований к точности, безопасности, надежности, устойчивости. С помощью этих программ возможно автоматическое разбиение плана помещения на зоны заданной площади, выбор мест размещения точек доступа системы определения местоположения, построение приближений карт уровня сигналов точек доступа, поиск “узких” мест помещения, в которых максимальна ошибка определения местоположения, проверка целесообразности добавления новых точек доступа и новых источников информации в систему.

Теоретическая значимость работы

Применяемые в системах определения местоположения мобильных объектов в помещениях методы и алгоритмы являются активно изучаемой областью математического моделирования. Приведенные в работе математические модели и методы развивают теоретические аспекты моделирования систем определения местоположения. Вероятностное обобщение задачи определения метрической размерности графа и построения разрешающего множества вершин вносит вклад в развитие теории графов. Разработанные математические модели и алгоритмы учета дополнительной информации расширяют возможности теоретических исследований в области проектирования систем внутреннего позиционирования.

Практическая значимость работы

Разработанные математические модели, алгоритмы и программы имеют практическую ценность при проектировании систем определения местоположения мобильных объектов в помещениях, определении параметров этих систем, их установке и эксплуатации, для повышения эффективности работы систем определения местоположения и сокращения затрат на калибровку систем. Методы решения задачи определения мест размещения точек доступа можно использовать для обеспечения заданной скорости передачи информации с учетом интерференций сигналов, предотвращения перегрузки трафика беспроводной сети, повышения качества работы систем определения местоположения объектов в помещениях, сокращения времени их работы в режиме off-line. Разработанные методы используются в системах определения местоположения, разработанных на базе ИТ-парка ПетрГУ.

Методология и методы исследования

В диссертационной работе используются методы математического моделирования, включая методы моделирования пространственно распределенных систем взаимодействующих объектов, исследования операций, системного анализа, теории вероятностей, дискретной математики, в том числе теории графов и гиперграфов. При разработке и реализации численных методов применяются методы построения и анализа эффективных алгоритмов, объектно-ориентированное программирование. Программы написаны на языках C++, C# и Java.

Положения, выносимые на защиту

1. Класс математических моделей, описывающих системы внутреннего позиционирования, предназначенных для решения задач определения оптимального числа и размещения узлов этих систем.
2. Численный метод определения оптимальных мест размещения точек доступа системы внутреннего позиционирования.
3. Вероятностное обобщение задачи метрической размерности графа и задача построения разрешающего множества с учетом отказов.
4. Численный метод динамического построения карт уровня сигналов добавляемой точки доступа системы внутреннего позиционирования в ходе ее эксплуатации, позволяющий быстро адаптировать систему к новым условиям функционирования.

5. Развитие численных методов совместного использования информации, поступающей из различных источников, в том числе от инерциального измерительного модуля, для определения местоположения объектов внутри сооружений.
6. Комплекс программ, имитирующий систему определения местоположения мобильных объектов в закрытых сооружениях, предназначенный для анализа ее работы и определения ее параметров с учетом выдвигаемых требований и ограничений.
7. Методика развития системы внутреннего позиционирования и рекомендации к применению предложенных подходов.

Степень достоверности

Адекватность предложенных математических моделей, работоспособность и достоверность расчетов разработанных алгоритмов были проверены на реальных данных, полученных в ходе тестирования систем определения местоположения мобильных объектов, созданных в лаборатории по разработке беспроводных сетей нового поколения ПетрГУ и в МИП ООО “Наносети” при участии автора диссертации. Мировой уровень результатов исследований подтверждается внешними независимыми экспертными оценками. В 2013 году разработанная технология внутреннего позиционирования RealTrac заняла первое место в международном конкурсе систем определения местоположения внутри помещений EvAAL-2013 (<http://evaal.aalooa.org/>).

Апробация результатов

Материалы диссертационного исследования и предложенные технологии докладывались и обсуждались на различных конференциях, конкурсах и семинарах, среди них: 11th International Conference on Telecommunications for Intelligent Transport Systems (ITST-2011), Санкт-Петербург, 2011 год; 1st International Symposium on Wireless Systems IDA-ACS-SWS, Offenburg, Germany, 2012 год; X Международная научно-техническая конференция “Новые информационные технологии в ЦБП и энергетике”, Петрозаводск, 2012 год; Всероссийская конференция с международным участием “Применение космических технологий для развития арктических регионов”, Архангельск, 2013 год; конкурс “Evaluating AAL Systems through Competitive Benchmarking”, Smart House Living Lab of the Polytechnic University of Madrid, Spain; Международный фо-

рум “Классический университет в пространстве трансграничности на севере Европы: стратегия инновационного развития”, Петрозаводск, 2014 год; IX Всероссийская научно-практическая конференция “Научно-образовательная информационная среда XXI века”, Петрозаводск, 2015 год; III Международная научно-практическая конференция “Инновационные технологии в науке и образовании”, Чебоксары, 2015 год; научный семинар кафедры теории вероятностей и анализа данных Петрозаводского государственного университета, Петрозаводск, 2015 год; IX Международная Петрозаводская конференция “Вероятностные методы в дискретной математике”, Петрозаводск, 2016 год; XI Международная научно-техническая конференция “Автоматизация и управление в ЦБП, ЛПК и энергетике”, Петрозаводск, 2016 год; научный семинар факультета математики и информационных технологий Петрозаводского государственного университета, Петрозаводск, 2016 год; X Всероссийская научно-практическая конференция “Научно-образовательная информационная среда XXI века”, Петрозаводск, 2016 год; IX Международная конференция “Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий” (ПМТУКТ-2016), Воронеж, 2016 год; Международная конференция “Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь” (DCCN-2016), Москва, 2016 год; научный семинар Института прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН, 2016 год; X Международная конференция “Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий” (ПМТУКТ-2017), Воронеж, 2017 год; Международная конференция “Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь” (DCCN-2017), Москва, 2017 год.

Часть результатов диссертационного исследования была получена в ходе выполнения работ над грантом Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт номер 14.ВВВ.21.0162), в котором автор диссертации является соисполнителем.

Публикации по теме исследования

Представленные результаты диссертационного исследования опубликованы в научных изданиях, всего по теме диссертации опубликовано 38 работ, в том числе 1 статья в журнале, входящем в базу данных Web of Science, в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК 14 ра-

бот, 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Материалы диссертационной работы изложены в материалах международных научных конференций, включая 2 публикации, входящих в базу данных Scopus.

Личное участие

Все основные результаты диссертации были получены автором самостоятельно. В частности, автором диссертации были построены и исследованы представленные математические модели, разработаны методы решения поставленных задач, предложенные алгоритмы доведены до программной реализации.

Все опубликованные работы были спланированы и оформлены при прямом участии автора диссертации. В работе [1] описана технология RealTrac, созданная коллективом соавторов при участии автора диссертации, лежащая в основе исследуемых систем определения местоположения. В статьях [2 – 9] представлены разработанные автором диссертации математические модели определения местоположения и методы решения поставленных задач. В этих работах автору принадлежит также постановка задач, доказательство утверждений, программная реализация алгоритмов, анализ тестовых испытаний. Как правило, соавторы отвечали за описание предметной области исследуемых задач, а также помощь при организации экспериментов.

Структура и объем работы

Основная часть диссертационной работы состоит из введения, пяти глав и заключения. Представлен библиографический список использованной литературы и два приложения. Общий объем работы составляет 296 страниц сквозной нумерации, из них 257 страниц основного текста и 2 приложения на 10 страницах. Список литературы содержит 211 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, проведен анализ степени разработанности научной проблемы и предложены подходы к ее решению, ставятся цель и задачи исследования, определена научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимость, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов работы, приведены сведения об их апробации.

В **первой главе** рассмотрены известные модели и системы определения местоположения мобильных объектов внутри помещений, отмечены тенденции и перспективы их развития. В главе описываются необходимые для дальнейшего изложения понятия и термины. Концептуальная модель комплекса решаемых в диссертационной работе задач внутреннего позиционирования представлена на рисунке 1.

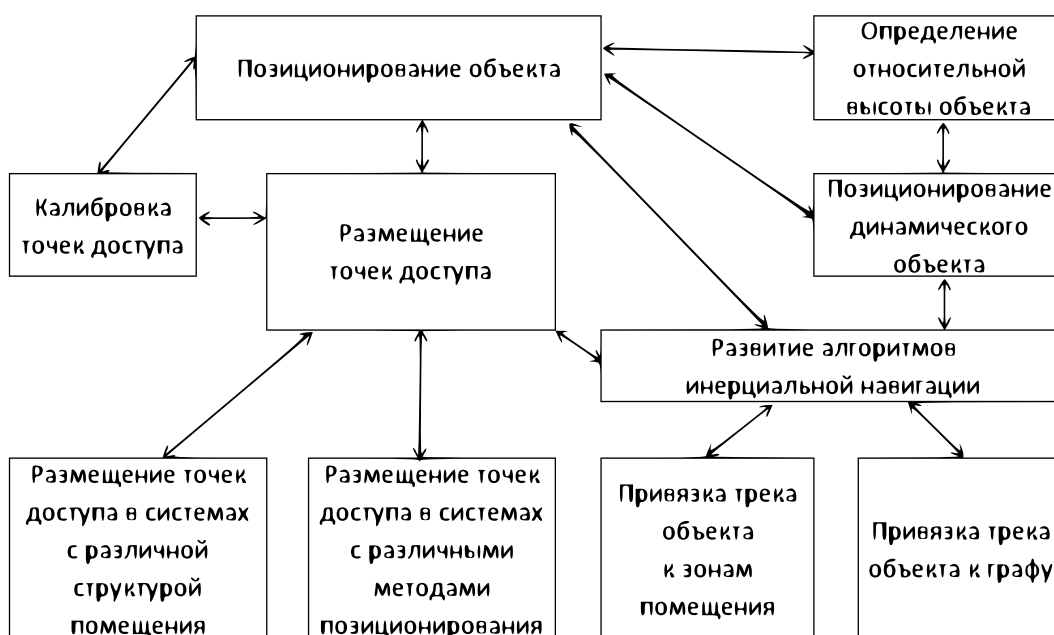


Рис. 1: Взаимосвязи решаемых задач позиционирования

Решение представленных задач приведет к улучшению технических характеристик системы внутреннего позиционирования. Например, решение задачи оптимального размещения точек доступа с учетом применения инерциальной навигации приведет к увеличению периода опроса мобильных устройств, что повлияет на уменьшении общей стоимости системы за счет снижения числа стационарных точек доступа. Применение алгоритма автоматической калибровки точек доступа повысит удобство и быстроту развертывания системы позиционирования.

Во **второй главе** разрабатываются модели и методы решения задачи оптимального размещения точек доступа системы определения местоположения мобильных объектов в помещении.

Пространство, в котором перемещается мобильный объект для определенности будем называть *помещением*, хотя фактически это может быть и зданием, и шахтой, даже частично открытым пространством.

Пусть план помещения разбит некоторым образом на множество зон. Физически зонам соответствуют небольшие комнаты, части комнат или коридоров. Разбиение на зоны плана помещения осуществляется, например, путем накладывания прямоугольной сетки – в этом случае каждая зона представляет собой прямоугольный участок. Как правило, зоны не содержат внутри себя стен или перегородок.

Пусть имеется множество возможных позиций установки стационарных точек доступа беспроводной сети. Предположим, что для каждой такой позиции известны распределения вероятностей уровней сигналов во всех зонах от точки доступа. Отметим, что распределения вероятностей уровней сигналов и их параметры могут быть предложены и оценены на основе математических моделей распределения сигнала в помещениях.

Введем обозначения математической модели.

Система определения местоположения $L = (X, d, V, I, S, u_D^*)$, где

- X – метрическое пространство с метрикой d ;
- V – конечное множество зон, $V = \{v_1, \dots, v_n\} \subset X$;
- I – индексное множество мест размещения точек доступа;
- S – множество уровней сигнала от точек доступа, $S \subset \mathbb{Z}$;
- u_D^* – семейство функций определения местоположения, $D \subset I$.

Для учета потерь сигналов от точек доступа во множество S можно добавить специальный элемент, соответствующий потере сигнала.

Рассмотрим случайные величины $\xi, \eta_i, i \in I$, где

- ξ принимает значения из множества $J = \{1, \dots, n\}$ и ее значение соответствует номеру зоны;
- η_i принимает значения из множества S , равные результатам измерения датчиком объекта, находящегося в зоне v_ξ , сигнала от точки доступа с номером i .

Случайные величины $\eta_i, (i \in I)$ предполагаются в совокупности условно независимыми относительно случайной величины ξ , то есть:

$$P(\eta_{i_1} = s_{i_1}, \dots, \eta_{i_2} = s_{i_2} \mid \xi = j) =$$

$$= P(\eta_{i_1} = s_{i_1} \mid \xi = j) \dots P(\eta_{i_2} = s_{i_2} \mid \xi = j).$$

Пусть заданы вероятности

$$\begin{aligned} P(\xi = j) &= p_j, \quad j \in J, \\ P(\eta_i = s \mid \xi = j) &= q_{ijs}, \quad i \in I, \quad s \in S, \quad j \in J, \\ \sum_{s \in S} q_{ijs} &= 1, \quad i \in I, \quad j \in J. \end{aligned}$$

Обозначим:

\bar{s} – вектор уровней сигналов, регистрируемых мобильным объектом от множества точек доступа I , или любого его подмножества;

$S(D)$ – множество всех возможных векторов уровней сигнала от точек доступа подмножества $D \subset I$;

$\bar{\eta}$ – вектор случайных величин η_i , $i \in D \subset I$.

Формально определение местоположения описывается семейством функций (решающих правил) $\{u_D^*(\cdot)\}_{D \subset I}$, где

$$u_D^* : S(D) \rightarrow X.$$

Обозначим вероятности:

$P(\xi = j)$ – априорная вероятность нахождения мобильного объекта в зоне v_j ;

$P(\xi = j, \bar{\eta} = \bar{s})$ – совместная вероятность того, что мобильный объект находится в зоне v_j и им был зарегистрирован вектор уровней сигнала \bar{s} ;

$P(\bar{\eta} = \bar{s} \mid \xi = j)$ – вероятность того, что мобильным объектом зарегистрирован вектор уровней сигнала \bar{s} при условии, что он находится в зоне v_j ;

$P(\xi = j \mid \bar{\eta} = \bar{s})$ – апостериорная вероятность того, что мобильный объект находится в зоне v_j при условии, что зарегистрирован вектор уровней сигнала \bar{s} .

Пусть выбрано некоторое подмножество $D \subset I$ мест размещения точек доступа. Значения случайной величины $d(v_\xi, u_D^*(\bar{\eta}))$ являются ошибками определения местоположения объекта.

Математическое ожидание ошибки определения местоположения равно

$$F(D) = M(d(v_\xi, u_D^*(\bar{\eta}))) = \sum_{\bar{s} \in S(D)} \sum_{j=1}^n P(\xi = j, \bar{\eta} = \bar{s}) d(v_j, u_D^*(\bar{s})). \quad (1)$$

Сформулируем две задачи оптимального размещения точек доступа системы определения местоположения объектов.

Задача P1. Задано число m . Необходимо найти подмножество мест размещения точек доступа $D \subset I$, число элементов которого равно m и функция $F(D)$ принимает минимальное значение.

Задача P2. Задано число ε . Необходимо найти подмножество мест размещения точек доступа $D \subset I$ с минимальным числом элементов, для которого $F(D) \leq \varepsilon$.

В диссертации исследованы свойства системы L и задач P1 и P2, разработаны алгоритмы их решения.

Системы определения местоположения L можно квалифицировать по способу построения множеств X и V , по алгоритму решающего правила u_D^* , по типу модели сигнала точек доступа в зонах помещения (детерминированная или стохастическая).

Рассмотрено четыре способа построения множеств V и X для представления в модели плана помещения:

1. X – произвольное конечное множество, $V = X$.
2. $X = \mathbb{R}^2(\mathbb{R}^3)$ – множество точек дву- или трехмерного пространства, $V \subset X$.
3. X – конечное множество вершин связного неориентированного взвешенного графа, $V = X$.
4. X – конечное множество вершин гиперграфа.

Первый способ является наиболее общим, выявленные для него свойства системы L очевидно выполняются и при частных способах построения множества V .

Во втором способе предполагается, что для каждой зоны заданы координаты ее “центральной” точки. В случае двумерного пространства

$$d(u, v) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2},$$

где $u = (x_1, y_1) \in X$, $v = (x_2, y_2) \in X$.

Третий способ соответствует системам внутреннего позиционирования, в которых моделью помещения служит неориентированный связный граф $G = (V, E)$, где V – множество вершин, E – множество ребер. Вершины графа обозначают зоны возможного местоположения объекта.

Соответствующие смежным вершинам зоны примыкают к друг другу, то есть являются соседними. Для каждого ребра (v_1, v_2) задан положительный вес $w(v_1, v_2)$, который можно интерпретировать как расстояние между центрами зон. Вес цепи, соединяющей вершины v_1 и v_2 , равен сумме весов ее ребер. Расстояние $d(v_1, v_2)$ между вершинами v_1 и v_2 равно минимальному весу соединяющей их цепи.

В некоторых системах определения местоположения план помещения представляется в виде гиперграфа (четвертый способ), в котором гиперребра объединяют схожие по вероятностным характеристикам зоны помещения. Представленная модель легко адаптируется в случае замены графа на гиперграф.

В диссертации предложены следующие варианты решающих правил определения местоположения объекта:

1. Выбор зоны с наибольшей апостериорной вероятностью.
2. Выбор средневзвешенной точки пространства.
3. Выбор зоны с минимальным математическим ожиданием ошибки.
4. Выбор точки пространства с минимальным математическим ожиданием ошибки.

Рассмотрим некоторые частные случаи модели системы определения местоположения L , отличающиеся различными способами построения множества V и выбором решающих правил. Для различия этих частных случаев будем использовать кодировку вида V_i/u_j , где i – номер способа построения V , j – номер варианта решающего правила.

Выбор зоны с наибольшей апостериорной вероятностью (модель V1/u1)

Пусть V – произвольное конечное множество, функция $u_D^*(\bar{s})$ возвращает зону с максимальной апостериорной вероятностью:

$$u_D^*(\bar{s}) = v_{j^*}, \quad j^* = \arg \max_{j=1, \dots, n} \{P(\xi = j \mid \bar{\eta} = \bar{s})\}. \quad (2)$$

Доказана следующая

Теорема 1. Пусть $D \subset I$, $i \in I$, $i \notin D$, $u_D^*(\bar{s})$ определяется по формуле (2) и для всех $\bar{s} \in S(D \cup \{i\})$ существует $j \in \{1, \dots, n\}$, что $P(\xi = j \mid \bar{\eta} = \bar{s}) \geq \frac{1}{2}$ тогда

$$F(D \cup \{i\}) \leq F(D).$$

В диссертации приведен пример, в котором не выполняются условия Теоремы 1, и при добавлении точки доступа увеличивается математическое ожидание ошибки определения местоположения объекта.

Выбор средневзвешенной точки пространства (модель V2/u2)

Пусть $X = \mathbb{R}^2$ либо $X = \mathbb{R}^3$. Рассмотрим систему определения местоположения, в которой после регистрации вектора уровней сигналов $\bar{s} \in S(D)$ от точек доступа множества D возвращается точка, координаты которой равны средневзвешенным суммам координат центров зон, в качестве весов используются условные вероятности зон:

$$u_D^*(\bar{s}) = \sum_{j=1}^n P(\xi = j \mid \bar{\eta} = \bar{s})v_j.$$

В диссертации показано, что и в данном случае возможна ситуация, когда добавление точки доступа увеличивает математическое ожидание расстояния между местоположением мобильного объекта и средневзвешенной точкой.

Выбор зоны с минимальным математическим ожиданием ошибки (модель V1/u3)

Пусть X – произвольное конечное множество, $V = X$ и функция определения местоположения возвращает зону, для которой будет минимально условное математическое ожидание ошибки определения местоположения:

$$u_D^*(\bar{s}) = v_{k^*}, \quad k^* = \arg \min_{k=1, \dots, n} \left\{ \sum_{j=1}^n P(\xi = j \mid \bar{\eta} = \bar{s})d(v_j, v_k) \right\}. \quad (3)$$

В диссертации доказана следующая теорема.

Теорема 2. Пусть $D \subset I$, $i \in I$, $i \notin D$ и $u_D^*(\bar{s})$ определяется по формуле (3), тогда

$$F(D \cup \{i\}) \leq F(D).$$

Теорема 2 означает, что при указанном решающем правиле средняя ошибка определения местоположения не возрастает при добавлении точек доступа.

Выбор точки пространства с минимальным математическим ожиданием ошибки (модель V2/u4)

Отдельно рассмотрим случай когда $X = \mathbb{R}^2$ либо $X = \mathbb{R}^3$ и $V \subset X$. Пусть функция определения местоположения возвращает точку X , для которой будет минимально условное математическое ожидание ошибки определения местоположения:

$$u_D^*(\bar{s}) = \arg \min_{x \in X} \left\{ \sum_{j=1}^n P(\xi = j \mid \bar{\eta} = \bar{s}) d(v_j, x) \right\}. \quad (4)$$

В данном случае задача поиска точки $u_D^*(\bar{s})$ называется задачей Ферма – Торричелли – Штейнера, ее решение находится при помощи обобщенного алгоритма Вайсфельда. Кроме того, имеет место аналог Теоремы 2, то есть средняя ошибка определения местоположения не возрастает при добавлении точек доступа.

Следующий частный случай модели системы определения местоположения L отдельно рассмотрен в **третьей главе**.

Модель определения местоположения на неориентированном графе (модель V3/u3)

Рассмотрим два частных случая системы определения местоположения на графе, отличающихся характером сигнала (детерминированный или стохастический). Будем предполагать, что $I = J$, то есть точки доступа “размещаются” в вершинах графа.

Детерминированный случай

Пусть для любых $i \in I$ и $j \in J$ вероятность $P(\eta_i = s \mid \xi = j)$ равна единице, если $s = d(v_i, v_j)$, и равна нулю в противном случае. Тогда задача P2 с параметром $\varepsilon = 0$ эквивалентна задаче определения метрической размерности графа. Рассмотрим ее подробнее.

Пусть $W = \{w_1, \dots, w_k\}$ – упорядоченное подмножество вершин графа. Кортеж

$$r(v \mid W) = (d(v, w_1), \dots, d(v, w_k))$$

называется *представлением* вершины v относительно W . Подмножество вершин $W \subset V$ называется *разрешающим*, если любые вершины u, v имеют различные представления $r(u \mid W)$ и $r(v \mid W)$. *Метрическая размерность* $\beta(G)$ графа G – это минимальное число вершин в разрешающем множестве. Разрешающее множество минимальной мощности

называется *базисом метрик* графа. Понятие метрической размерности графа ввел в 1975 году Slater и независимо в 1976 году Harary и Melter.

Задача определения метрической размерности графа и построения его базиса метрик в некотором приближении является аналогом задачи оптимального размещения точек доступа системы определения местоположения объектов в помещении. При этом базис метрик может состоять из вершин, соответствующих местам расположения точек доступа.

Разрешающее множество W графа G называется *отказоустойчивым*, если для любого $w \in W$ множество $W \setminus \{w\}$ является разрешающим множеством для G . *Отказоустойчивая метрическая размерность* $\beta'(G)$ графа G – это минимальное число вершин в отказоустойчивом разрешающем множестве. Отказоустойчивое разрешающее множество минимальной мощности называется *отказоустойчивым базисом метрик* графа G . В системе определения местоположения это соответствует возможности определения местоположения объекта даже в случае потери информации от одной из точек доступа.

Сильное произведение $G_1 \boxtimes G_2$ графов $G_1 = (V_1, E_1)$ и $G_2 = (V_2, E_2)$ – это граф $G = (V, E)$, в котором $V = V_1 \times V_2$ и любые две различные вершины (u_1, u_2) и (v_1, v_2) смежны в G тогда и только тогда, когда $u_1 = v_1$ и $(u_2, v_2) \in E_2$, или $u_2 = v_2$ и $(u_1, v_1) \in E_1$, или $(u_1, v_1) \in E_1$ и $(u_2, v_2) \in E_2$.

Обозначим $P_m = (I_m, J_m)$ – граф, являющийся простым путем с m вершинами, $I_m = \{1, \dots, m\}$ и $J_m = \{(i, i + 1) \mid i = 1, \dots, m - 1\}$.

Сильное произведение двух простых цепей размера m на n – это граф $P_m \boxtimes P_n$. Множество вершин этого графа равно $V = I_m \times I_n$. Легко проверить, что в графе $P_m \boxtimes P_n$ расстояния между вершинами вычисляются по формуле $d(v_1, v_2) = \max\{|i_1 - i_2|, |j_1 - j_2|\}$, где $v_1 = (i_1, j_1)$ и $v_2 = (i_2, j_2)$. Сильное произведение двух простых цепей служит удобной моделью для изучения свойств задачи размещения точек доступа системы локализации и тестирования алгоритмов ее решения. Графы такого типа часто встречается в системах определения местоположения, так как они являются планарными и в них являются смежными только “близко” расположенные вершины. Смежные вершины при этом соответствуют соседним зонам помещения, ребра соответствуют путям перехода объекта из зоны в зону.

Известно, что $\beta(P_n \boxtimes P_n) = 3$, $\beta'(P_n \boxtimes P_n) = 4$ для $n \geq 2$, а также

имеет место следующая теорема.

Теорема 3. [Barragán-Ramírez, Rodríguez-Velázquez] *Для любых целых n и m таких, что $2 \leq m < n$,*

$$\beta(P_m \boxtimes P_n) = \left\lceil \frac{n + m - 2}{m - 1} \right\rceil,$$

где $\lceil \cdot \rceil$ – округление вверх.

На рисунке 2 черным цветом выделены вершины базиса метрик графа $P_3 \boxtimes P_{12}$.

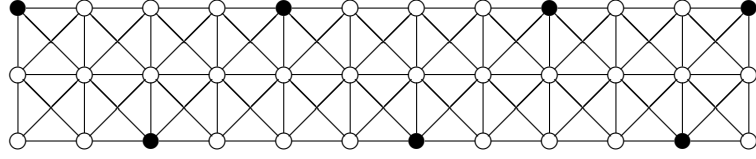


Рис. 2: Граф $P_3 \boxtimes P_{12}$

В диссертации получена верхняя граница для отказоустойчивой метрической размерности сильного произведения двух простых цепей и точная формула для частного случая. Результаты сформулированы в виде Теорем 4 и 5.

Теорема 4. *Для любых целых n и m таких, что $2 \leq m < n$ верно следующее. Если $(m - 1)$ делит $(n - 2)$, то*

$$\beta'(P_m \boxtimes P_n) \leq 2 \frac{n - 2}{m - 1} + 3,$$

иначе

$$\beta'(P_m \boxtimes P_n) \leq 2 \left\lceil \frac{n - 1}{m - 1} \right\rceil + 2.$$

Теорема 5. *Для любых целых n и m таких, что m четное, $m \geq 2$, $n \geq 2m - 1$ и $(m - 1)$ делит $(n - 1)$,*

$$\beta'(P_m \boxtimes P_n) = 2 \frac{n - 1}{m - 1} + 2.$$

В последнем случае отказоустойчивая метрическая размерность сильного произведения двух простых цепей в два раза больше, чем его обычная метрическая размерность.

На рисунке 3 показан граф $P_3 \boxtimes P_{11}$. Вершины отказоустойчивого базиса метрик окрашены черным цветом, $\beta'(P_3 \boxtimes P_{11}) = 12$.

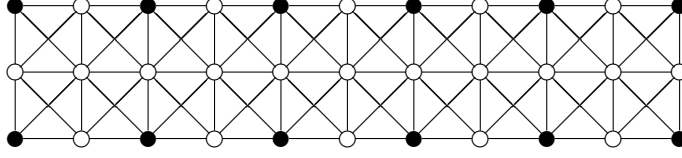


Рис. 3: Отказоустойчивый базис метрик графа $P_3 \boxtimes P_{11}$

Стохастический случай

Важным условием решения задачи размещения точек доступа является учет случайного характера уровня сигнала в зонах помещения и ошибок в определении расстояния между точками доступа и мобильным объектом. В связи с этим предлагается вероятностное обобщение задачи метрической размерности графа и соответствующая задача построения разрешающего множества.

Пусть в графе имеется несколько различных базисов метрик. Независимо от того, какой базис метрик будет выбран, представление каждой вершины относительно базиса будет уникальным. Однако, если добавить предположение, что расстояния между вершинами определяется с некоторой ошибкой, то некоторые варианты базисов метрик могут оказаться предпочтительней других.

Пусть задано неотрицательное целое число K и неотрицательные вещественные числа r_0, \dots, r_K такие, что

$$r_0 \geq \dots \geq r_K, \quad r_0 + 2 \sum_{k=0}^K r_k = 1.$$

Значение k ($0 \leq k \leq K$) будет означать возможную ошибку при определении расстояния от точки доступа до мобильного объекта, K – максимальное значение ошибки, r_k – вероятность ошибки k .

Пусть

$$P(\eta_i = s \mid \xi = j) = q_{ijs},$$

где

$$q_{ijs} = \begin{cases} r_k, & \text{если } k = |s - d(v_i, v_j)| \text{ и } k \leq K, \\ 0, & \text{если } |s - d(v_i, v_j)| > K, \\ j = 1, \dots, n, \quad s \in \mathbb{Z}. \end{cases}$$

Пусть $u_D^*(\bar{s})$ определяется по формуле (3). Обозначим

$$\beta''(\varepsilon) = \min\{|D| : D \subset \{1, \dots, n\}, F(D) \leq \varepsilon\}.$$

Значение $\beta''(\varepsilon)$ существует при $\varepsilon \geq \varepsilon^* = F(I)$. Введенное $\beta''(\varepsilon)$ обобщает понятие метрической размерности для модели, учитывающей ошибки при определении расстояний между вершинами графа. Если $K = 0$, то величина $\beta''(0)$ равна обычной метрической размерности графа.

Модель системы определения местоположения объектов на графе имеет важное значения при практическом построении систем внутреннего позиционирования, например, в шахтах.

Минимизация суммарной энтропии уровней сигналов во всех зонах помещения

Для количественной оценки эффективности схемы расположения точек доступа можно использовать понятие информационной энтропии. Точность определения местоположения в этом случае характеризуется правильностью указания зоны.

Рассматриваемый в работе алгоритм определения местоположения определяет условные вероятности возможного расположения объекта в зонах помещения после регистрации объектом уровней сигналов от точек доступа. Таким образом, можно говорить про неопределенность информации о местоположении объекта. Информационная энтропия позволяет оценивать такую информационную неопределенность. Если имеется ограничение на число используемых точек доступа, то можно искать такое подмножество позиций расположения точек доступа, для которого суммарная информационная энтропия для всех зон на данной территории, примет минимальное значение.

Рассмотрим условную энтропию $H_{\eta(D)}(\xi)$, означающую неопределенность информации о местоположении мобильного объекта после получения уровней сигнала от точек доступа множества D :

$$H_{\bar{\eta}(D)}(\xi) = - \sum_{\bar{s} \in S(D)} \sum_{j=1}^n P(\xi = j, \bar{\eta} = \bar{s}) \log_2 P(\xi = j \mid \bar{\eta} = \bar{s}).$$

Суммирование ведется только по тем слагаемым, для которых вероятность $P(\xi = j \mid \bar{\eta} = \bar{s})$ не равна нулю.

Применим свойство условной энтропии не возрастать при добавлении еще одного случайного события в условие. Пусть $D_1 \subset D_2 \subset I$. Тогда

$$H_{\bar{\eta}(D_2)}(\xi) \leq H_{\bar{\eta}(D_1)}(\xi).$$

Это означает, что условная энтропия не увеличивается при добавлении новых точек доступа.

Алгоритмы определения мест размещения точек доступа

В диссертации доказана следующая теорема.

Теорема 6. Задачи $P1$ и $P2$ являются NP-трудными.

Это означает, что для практического решения предложенных задач необходимо применять эвристические методы. Предложено несколько подходов к решению задачи $P1$: жадный алгоритм, локальный поиск и алгоритм последовательного увеличения числа покрываемых зон.

Рассмотрим следующий жадный эвристический алгоритм решения задачи $P1$.

Алгоритм 1.

ШАГ 0. Положим $D_0 = \emptyset$. Переход на ШАГ 1.

ШАГ k . Находим точку доступа $i \in I$, для которой достигается минимум значения целевой функции $F(D_{k-1} \cup \{i\})$. Положим

$$D_k = D_{k-1} \cup \{i\}.$$

Если $k = m$, то положим $D = D_k$ и СТОП; иначе – переход на ШАГ $(k + 1)$.

В этом алгоритме на первом шаге находится место размещения первой точки доступа, для которого будет минимально значение целевой функции. Найденная позиция точки доступа фиксируется и в дальнейшем не меняется. Далее аналогично находится место размещения второй точки доступа, ее позиция фиксируется, и так далее последовательно поступают для остальных точек доступа.

Оценку для решения, получаемого жадным алгоритмом для минимизации условной энтропии, дает следующая теорема.

Теорема 7. Пусть $F(D) = H_{\bar{\eta}(D)}(\xi)$, D' – подмножество множества I , возвращаемое жадным алгоритмом. Тогда

$$F(D') \leq F(D^*) + \frac{F(\emptyset) - F(D^*)}{e},$$

где

$$D^* = \arg \min \{F(\tilde{D}) \mid \tilde{D} \subset I, |\tilde{D}| = m\}.$$

По результатам тестирования лучшие результаты, по сравнению с жадным методом, дает следующий алгоритм, основанный на локальном поиске.

Алгоритм 2.

ШАГ 0. Начальное размещение m точек доступа D_1 формируем случайным образом или жадным алгоритмом. Положим $k = 1$. Переход на ШАГ 1.

ШАГ k . Перебором всех пар $i \in D_k, i' \in I \setminus D_k$ находим минимум

$$F' = \min_{i, i'} F(D_k \setminus \{i\} \cup \{i'\}).$$

Если $F' < F(D_k)$, то присвоим

$$D_{k+1} = D_k \setminus \{i\} \cup \{i'\},$$

где $(i, i') = \arg \min_{i, i'} F(D_k \setminus \{i\} \cup \{i'\})$, и переходим на ШАГ $(k + 1)$. Иначе положим $D = D_k$ и СТОП.

В данном алгоритме на первом шаге находится начальная конфигурация точек доступа. Далее делаются попытки улучшить конфигурацию путем изменения мест размещения всех точек доступа. Так происходит до тех пор, пока такое улучшение возможно.

Описанный алгоритм сходится за конечное число шагов, так как число конфигураций мест размещения точек доступа конечно и каждая конфигурация может быть перебрана не более одного раза. При этом не гарантируется получение оптимального решения задачи, алгоритм может привести к локально оптимальным решениям.

Для больших помещений предлагается применить специальный алгоритм, основанный на последовательном увеличении числа покрываемых зон. Введем необходимые обозначения. Пусть

r – параметр алгоритма, задает радиус “слышимости” точек доступа;

$\{I_1, \dots, I_k\}$ – разбиение индексного множества допустимых мест размещения точек доступа I ;

m_i – число точек доступа, размещаемых в позициях множества I_i ,

$$m = m_1 + \dots + m_k;$$

$d(u, v)$ – расстояние между местом размещения точки доступа u и центром зоны v .

Множество зон, “слышимых” точкой доступа u :

$$V_u = \{v \mid v \in V, d(u, v) \leq r\}.$$

Множество зон, “слышимых” хотя бы одной точкой доступа множества I_i :

$$V'_i = \bigcup_{u \in I_i} V_u.$$

Множество точек доступа, для которых существуют “слышимые” зоны множества V'_i :

$$I'_i = \{u \mid u \in I_{i'}, i' \leq i, \exists v \in V'_i d(u, v) \leq r\}.$$

Опишем шаги алгоритма.

Алгоритм 3.

ШАГ 0. Присвоить $i = 1$.

ШАГ i . Размещение при помощи метода полного перебора или локального поиска m_i точек доступа в позициях множества I_i . Значения целевой функции F необходимо рассчитывать, суммируя только по зонам множества V'_i , и учитывать вектора уровней сигналов только для точек доступа, принадлежащих множеству I'_i .

Если $i = k$, то СТОП, иначе перейти на ШАГ $(i + 1)$.

На первом шаге алгоритма размещается m_1 точка доступа в позициях множества I_1 . Далее эти позиции фиксируются и в дальнейшем не меняются. На втором шаге размещается m_2 точки доступа в позициях множества I_2 и далее эти позиции также фиксируются и далее не меняются. Так поступают для всех шагов $i \leq k$.

Параметры алгоритма (“слышимость” r , число элементов разбиения k , числа m_i) подбираются исходя из общего числа зон и мест возможного размещения точек доступа.

Для проверки адекватности предложенного подхода был проведен вычислительный эксперимент на данных, собранных в ходе эксплуатации системы определения местоположения на одном из этажей корпуса

ИТ-парк Петрозаводского государственного университета. Часть помещения была разбита на 125 квадратных зон размером два на два метра. При помощи Алгоритма 2, основанного на последовательном выполнении жадного метода и локального поиска, были определены места размещения семи точек доступа (рисунок 4).

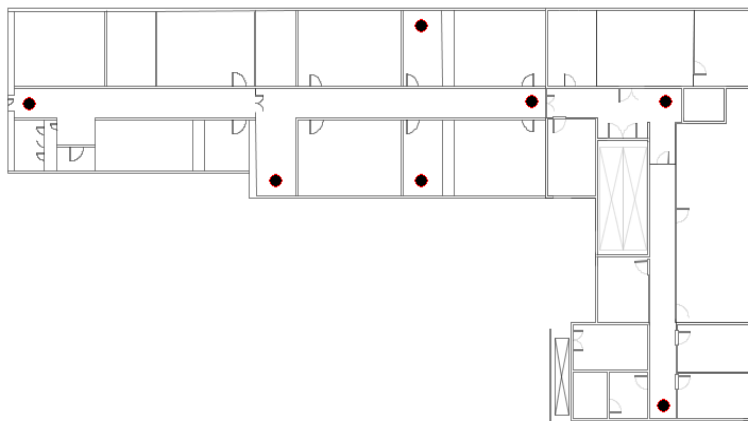


Рис. 4: Размещение семи точек доступа на этаже

Тестирование системы определения местоположения показало, что полученная расстановка точек доступа обеспечила в 75 % случаев ошибки в обнаружении мобильных объектов не превосходящие двух с половиной метров. Такая точность определения местоположения была признана допустимой и подтвердила практическую применимость разработанного алгоритма.

В **четвертой главе** разработаны методы решения задачи динамического создания карт уровня сигналов точек доступа, а также развиваются методы позиционирования, использующие данные из различных источников.

Динамическое создание карт уровня сигналов

Пусть план помещения разбивается на множество зон, для каждой из которых определяются карты уровня принимаемых сигналов от точек доступа. Поскольку уровень принимаемого сигнала сильно зависит от числа отражений, любые изменения в помещении, смена ориентации антенн или добавление новых точек доступа приводят к необходимости заново настраивать систему определения местоположения – пересчитывать карты уровня сигналов для нескольких или всех зон помещения.

Это трудоемкая и длительная операция, так как она требует непосредственного обхода оператором системы всего помещения, сбора большого количества измерений в определенных точках и определения для каждой из них среднего значения уровня сигнала.

В ходе диссертационного исследования разработан метод, основанный на EM-алгоритме, позволяющий динамически создавать карты уровня сигналов в процессе эксплуатации системы определения местоположения. При оценивании средних значений уровня сигналов использована функция, являющаяся аналогом функции правдоподобия.

Пусть n – число зон помещения, в которых может находиться мобильный объект, m – число точек доступа. На приемной стороне уровни сигналов от точек доступа являются дискретными величинами, поскольку радиопередача ведется в цифровой форме. Тогда в ходе настройки системы необходимо для каждой точки доступа $i \in I$ оценить распределение $P(\eta_i = s \mid \xi = j)$ условных вероятностей уровней сигнала s в зонах $j = 1, \dots, n$.

Предположим, что имеется некоторое число точек доступа, для которых известны распределения вероятностей уровней сигнала в каждой зоне помещения. Пусть добавляется новая точка доступа, для которой не определены распределения вероятностей $P(\eta_i = s \mid \xi = j)$ уровней сигналов в зонах.

Предположим для простоты, что уровни сигнала от новой точки доступа являются непрерывными случайными величинами η_1, \dots, η_K , которые в результате K независимых измерений приняли значения s_1, \dots, s_K .

В модели примем плотности распределений уровней сигналов в зонах v_j равными

$$P(\eta = s \mid \xi = j; a_j, \sigma_j) = \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(s - a_j)^2}{2\sigma_j^2}\right), \quad j = 1, \dots, n, \quad (5)$$

Теоретически в этом случае допускается ненулевая вероятность для отрицательных значений уровня сигналов, но она является ничтожно малой. Параметры a_j , σ_j – математические ожидания и среднеквадратические отклонения значений уровня сигнала в зонах $j = 1, \dots, n$ – априори не известны. Задача состоит в поиске их точечных оценок.

Пусть q_{kj} – известные вероятности нахождения объекта в зоне v_j в момент регистрации k -го измерения, которые могут быть полученные на

основе обработки сигналов от имеющихся (“старых”) точек доступа или из других источников.

Плотность распределения уровня сигнала s в момент регистрации k -го измерения вычисляется по формуле полной вероятности:

$$P_k(\eta = s) = \sum_{j=1}^n P(\eta = s \mid \xi = j; a_j, \sigma_j) q_{kj}.$$

Составим функцию, являющуюся аналогом логарифмической функции правдоподобия для измерений s_1, \dots, s_K :

$$L(\bar{s}; \bar{a}, \bar{\sigma}) = \sum_{k=1}^K \ln \left(\sum_{j=1}^n P(\eta = s_k \mid \xi = j; a_j, \sigma_j) q_{kj} \right), \quad (6)$$

где $\bar{s} = (s_1, \dots, s_K)$, $\bar{a} = (a_1, \dots, a_n)$ и $\bar{\sigma} = (\sigma_1, \dots, \sigma_n)$. В случае, если вероятности q_{kj} меняются от измерения к измерению, случайные величины η_1, \dots, η_K будут распределены по-разному, и в строгом смысле функция (6) не является функцией правдоподобия. Задача оценивания параметров в такой постановке сама по себе является нетривиальной. Предлагается оценивать векторы \bar{a} и $\bar{\sigma}$ при помощи поиска максимума этой функции.

Рассмотрим систему уравнений, в которой приравнены к нулю частные производные функции (6) по a_j и σ_j :

$$\frac{\partial L(\bar{s}; \bar{a}, \bar{\sigma})}{\partial a_j} = 0, \quad \frac{\partial L(\bar{s}; \bar{a}, \bar{\sigma})}{\partial \sigma_j} = 0, \quad j = 1, \dots, n. \quad (7)$$

Введем обозначения

$$c_{kj}(\bar{a}, \bar{\sigma}) = \exp \left(-\frac{(s_k - a_j)^2}{2\sigma_j^2} \right) q_{kj} \Big/ \left(\sum_{j'=1}^n \frac{1}{\sigma_{j'}} \exp \left(-\frac{(s_k - a_{j'})^2}{2\sigma_{j'}^2} \right) q_{kj'} \right),$$

$$\gamma_{kj}(\bar{a}, \bar{\sigma}) = \frac{c_{kj}(\bar{a}, \bar{\sigma})}{\sum_{k'=1}^K c_{k'j}(\bar{a}, \bar{\sigma})},$$

$$f_j^a(\bar{a}, \bar{\sigma}) = \sum_{k=1}^K \gamma_{kj}(\bar{a}, \bar{\sigma}) s_k, \quad j = 1, \dots, n,$$

$$f_j^\sigma(\bar{a}, \bar{\sigma}) = \sqrt{\sum_{k=1}^K \gamma_{kj}(\bar{a}, \bar{\sigma})(s_k - a_j)^2}, \quad j = 1, \dots, n,$$

$$f^a(\bar{a}, \bar{\sigma}) = (f_1^a(\bar{a}, \bar{\sigma}), \dots, f_n^a(\bar{a}, \bar{\sigma})),$$

$$f^\sigma(\bar{a}, \bar{\sigma}) = (f_1^\sigma(\bar{a}, \bar{\sigma}), \dots, f_n^\sigma(\bar{a}, \bar{\sigma})),$$

$$f(\bar{a}, \bar{\sigma}) = (f^a(\bar{a}, \bar{\sigma}), f^\sigma(\bar{a}, \bar{\sigma})).$$

Система уравнений (7) эквивалентна уравнению

$$(\bar{a}, \bar{\sigma}) = f(\bar{a}, \bar{\sigma}), \quad (8)$$

для решения которого предлагается следующий итерационный алгоритм. Пусть задана точность вычислений ε .

Алгоритм 4.

ШАГ 0. Присвоим начальные значения

$$(\bar{a}^{(0)}, \bar{\sigma}^{(0)}) = (\underbrace{(0, \dots, 0)}_n, \underbrace{(1, \dots, 1)}_n),$$

переходим на ШАГ 1.

ШАГ t. Присвоим

$$(\bar{a}^{(t)}, \bar{\sigma}^{(t)}) = f(\bar{a}^{(t-1)}, \bar{\sigma}^{(t-1)}).$$

Если $\|(\bar{a}^{(t)}, \bar{\sigma}^{(t)}) - (\bar{a}^{(t-1)}, \bar{\sigma}^{(t-1)})\| > \varepsilon$, то переходим на ШАГ $(t + 1)$, иначе присвоим $(\bar{a}, \bar{\sigma}) = (\bar{a}^{(t)}, \bar{\sigma}^{(t)})$ и СТОП.

Пересчет $\bar{a}^{(t)}$ соответствует М-шагу, вычисление $c_{kj}(\bar{a}^{(t)}, \bar{\sigma}^{(t)})$ соответствует Е-шагу ЕМ-алгоритма. Отличие представленного алгоритма от ЕМ-алгоритма состоит в отсутствии на М-шаге пересчета значений q_{kj} .

Рассмотрим обобщение задачи. Пусть имеется несколько точек доступа, для которых построены карты уровня сигналов. Добавляется несколько новых точек доступа. Необходимо для них построить карты зон.

Пусть i_1, \dots, i_m – номера точек доступа, для которых имеются карты зон, i_{m+1}, \dots, i_{m+r} – точки доступа, для которых требуется построить карты зон.

Предлагается следующий алгоритм решения поставленной задачи.

Алгоритм 5.

ШАГ 0. Присвоить $l = 1$, перейти на ШАГ 1.

ШАГ l .

1. Получить K наборов измерений уровня сигнала от точек доступа i_1, \dots, i_{m+l} .
 2. Используя карты уровня сигналов для точек доступа i_1, \dots, i_{m+l-1} , вычислить q_{kj} для всех $k = 1, \dots, K, j = 1, \dots, n$.
 3. Используя алгоритм 4 построить карту уровня сигнала для точки доступа i_{m+l} .
 4. Если $l = r$, то СТОП, иначе – перейти на ШАГ $(l + 1)$.
-

Полученные результаты также могут быть применены для построения систем определения местоположения с резервными точками доступа, для которых отсутствуют карты уровня сигналов. Кроме того, описанный алгоритм можно использовать для корректировки уже существующих карт уровня сигналов.

В главе разработаны новые методы использования в системах определения местоположения информации, получаемой из дополнительных источников. Дополнительной информацией для уточнения местоположения могут служить измерения, полученные с помощью встроенного в мобильное устройство модуля распознавания движения. Обычно такие модули имеют в своем составе датчики ускорения (акселерометры) и угловой скорости (гироскопы), а также магнитометры и датчики атмосферного давления.

Привязка траектории объекта к плану здания

Встроенный в мобильное устройство модуль распознавания движения может определять траекторию движения, по которой движется устройство. Если мобильное устройство несет человек, то встроенный модуль может оценить длину и направление каждого шага. Однако данные измерения, как правило, содержат ошибку, например, погрешность в оценке длины шага может достигать 10% от длины шага, а ошибка в оценке направления движения – градус в секунду.

Траектория, полученная от встроенного модуля распознавания движения, может быть скорректирована, если принять во внимание информацию о структуре помещения, внутри которого происходит движение.

Очевидно, что при движении человек не может идти сквозь стены, следовательно полученная траектория не может пересекаться со стенами внутри здания.

Задача вписывания трека объекта в план помещения особенно актуальная, когда в локальной системе определения местоположения не хватает других данных для расчета позиции объекта. Поскольку радиочастотный диапазон для всех радиотехнологий ограничен, а эфир делится между многими участниками сети, выделяемая полоса пропускания может не обеспечить передачу большого количества данных и проведение дополнительных измерений расстояний. В таких условиях мобильное устройство рассчитывает собственную траекторию по данным встроенных датчиков движения, и лишь изредка передает ее на сервер. Эта ситуация может наблюдаться в системах определения местоположения на основе измерения времени распространения сигнала в режиме экономии эфира, например, в технологии RealTrac.

Трек состоит из последовательных точек, заданных в некоторой системе координат, не привязанной к системе координат помещения. Для решения задачи привязки трека к плану помещения необходимо на плане помещения задать точку для совмещения с ней точки начала координат трека и определить угол поворота системы координат трека по отношению к системе координат помещения.

В диссертации описан разработанный итерационный двухэтапный алгоритм привязки трека к плану помещения (**Алгоритм 6**). На первом этапе число шагов алгоритма равно числу звеньев трека. На каждом шаге для всех зон подбираются изменения длины и направления очередного звена трека, при которых звено заканчивается внутри зоны. На втором этапе путем обратной прогонки находится трек с минимальным, в некотором смысле, числом изменений.

Рассмотрим демонстрацию работы Алгоритма 6 привязки трека к плану помещения. На рисунке 5 представлен план помещения, на котором имеются несколько комнат и длинный коридор, нанесен реальный трек объекта. Начальная точка находится в правой части коридора. На рисунке 6 представлен трек, зафиксированный при помощи модуля распознавания движения, состоящий из 171 точки. Начальная точка – в правом верхнем углу. Начальное направление движения объекта относительно сторон света неизвестно. На рисунке 7 продемонстрирован

результат привязки трека к плану помещения. Шаг сетки был равен одному метру. Видно, что в целом удалось вписать трек в план помещения. Средняя ошибка между истинными положениями объекта и рассчитанным составила 0,8 м.

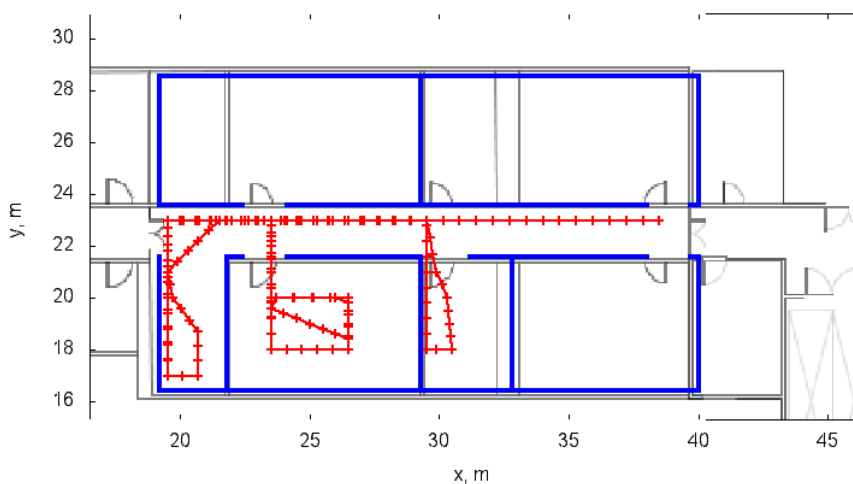


Рис. 5: Реальный трек объекта на плане помещения

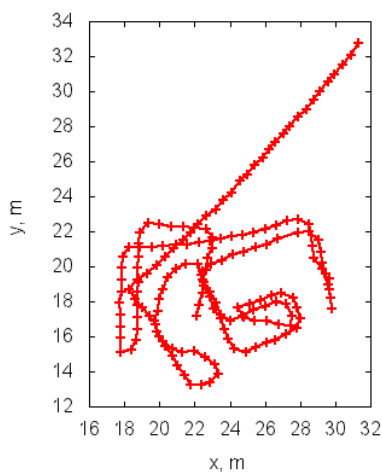


Рис. 6: Зафиксированный трек объекта

Определение местоположения объекта на графе

В этой же главе предлагается метод определения местоположения объектов в шахте с учетом ошибок измерений расстояний до объекта от точек доступа, учитывающий возможные перемещения объектов в интервалах между измерениями, а также метод, использующий данные от инерциального измерительного модуля.

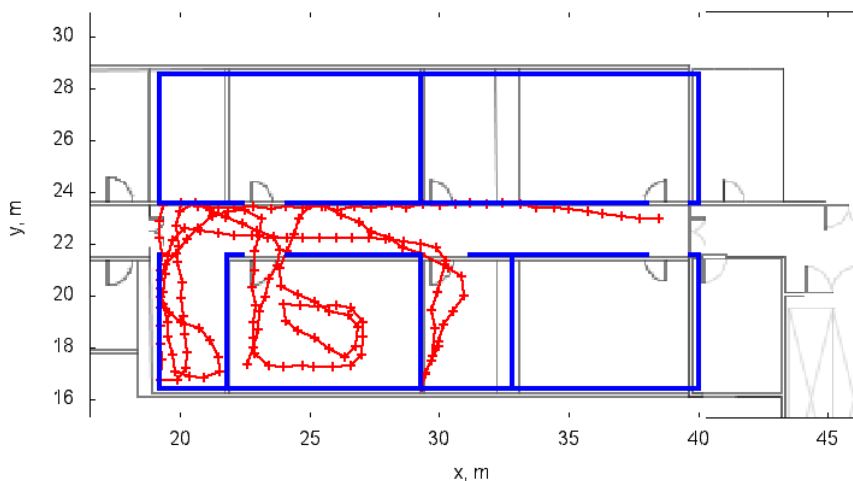


Рис. 7: Трек, привязанный к плану помещения

Определение местоположения по расстояниям от точек доступа с учетом движения объекта

Математической моделью шахты служит неориентированный взвешенный граф. Ребрам графа соответствуют прямолинейные части осей горных выработок (тоннели, штреки, стволы и прочее), вершинам – места их соединений и размещений точек доступа. Предполагается, что на ребрах графа могут помещаться точки, соответствующие местам возможного положения объекта. Помещаемая на ребре точка определяется путем указания расстояния до начала этого ребра. Для описания возможных в данный момент времени мест расположения объекта используется множество отрезков на ребрах графа. Отрезки состоят из точек, расстояние до которых от начальной позиции находится в заданном интервале значений. Периодически проводятся измерения расстояний от точек доступа до объекта. За время между измерениями объект может переместиться на некоторое расстояние и зона возможного местоположения объекта должна быть расширена. В модели для учета возможного перемещения объекта используется операция “расширения” отрезков на ребрах графа.

Разработан двухшаговый итерационный метод определения местоположения объектов на графе, использующий оценки расстояний от объекта до точек доступа (**Алгоритм 7**). На первом шаге (перед каждым измерением расстояний от точек доступа) выполняется операция расширения отрезков, которая увеличивает область возможного нахождения объекта. На втором шаге (после измерения расстояний от точек досту-

па) отсекаются “лишние” отрезки и, тем самым, уменьшается область возможного нахождения объекта. Далее происходит переход на первый шаг метода. Для быстрого выполнения операции расширения всех отрезков графа был разработан специальный алгоритм, представленный в диссертации. Отличительной особенностью алгоритма является “одновременное” расширение всех отрезков с последующим объединением пересекающихся элементов.

Определение местоположения методом привязки траектории объекта к графу

Разработан и реализован метод для решения задачи определения местоположения мобильного объекта на графе на основе анализа траектории его движения из известной точки. Траектория “привязывается” к графу, вершины которого являются точками трехмерного пространства. Привязка состоит в укладке на граф узлов траектории мобильного объекта.

Рассмотрим шаги алгоритма привязки траектории объекта к графу. На вход алгоритма подаются трехмерные координаты начальной позиции \mathcal{A} объекта и N точек A_1, \dots, A_N траектории T . На выходе – последняя точка “привязанной” к графу траектории. В алгоритме используется множество отрезков S на ребрах графа с операцией расширения всех отрезков на заданную длину и операцией “усечения” отрезков, а также параметр Δd .

Алгоритм 8.

ШАГ 1. Установить $S = \{s\}$, где s – отрезок, состоящий из одной точки \mathcal{A} на соответствующем ребре графа. Присвоить $j = 2$.

ШАГ 2. Вычислить $r = \rho(A_{j-1}, A_j)$ – величину максимально возможного смещения объекта на графе.

ШАГ 3. Расширить все отрезки множества S на величину r .

ШАГ 4. Пусть B – ближайшая к A_j точка среди отрезков множества S . Присвоить d расстояние между точками A_j и B .

ШАГ 5. Отсечь “лишние” отрезки на множестве S путем их пересечения со сферой с центром в точке A_j и радиусом $d + \Delta d$.

ШАГ 6. Если $j = N$, то вернуть точку B . Иначе – присвоить $j = j + 1$ и перейти на шаг 2.

На первом шаге устанавливаются начальные значения переменных алгоритма. На втором и третьем шагах определяется величина возможного смещения объекта и выполняется операция расширения отрезков. На четвертом и пятом шагах выполняется усечение отрезков – остаются только фрагменты отрезков, состоящие из точек, наиболее близких к очередной точке наблюдаемой траектории. Шестой шаг зацикливает алгоритм.

Разработанный алгоритм можно применять для решения задачи позиционирования объектов в шахтах. В туннелях шахты на некотором расстоянии друг от друга размещены точки доступа. В ходе работы системы фиксируются моменты прохождения объектами мест размещения точек доступа, в промежутках между этими моментами при помощи инерциальных измерительных модулей рассчитываются траектории их движения. Преимущество предлагаемого подхода заключается в возможности одновременного определения местоположения большого числа устройств в режиме экономии эфира при относительно невысокой стоимости используемых датчиков системы.

Имитация траекторий движения объекта

Для тестирования разработанных алгоритмов был создан имитатор, генерирующий маршрут мобильного объекта, проведено тестирование алгоритмов на устойчивость, проверена адекватность получаемых решений.

На первом шаге имитатора вызывается функция, которая генерирует траекторию объекта в виде простой цепи, начинающейся из указанной точки на некотором ребре графа. Траектория проходит случайным образом по ребрам графа на заданное расстояние (используется поиск в глубину со случайным выбором посещаемых вершин). Полученная траектория состоит из начальной точки и точек, являющихся концами ребер, вдоль которых “перемещался” объект. При этом каждая вершина графа посещается не более одного раза. На втором шаге полученная траектория разбивается на звенья случайной длины (из заданного интервала значений). На третьем шаге моделируются ошибки в измерении длин звеньев траектории и углов между ними. Для этого каждое звено полученной на втором шаге траектории случайным образом растягивается или сжимается и меняется его направление. На четвертом шаге координаты точек полученной траектории с ошибками измерений округляются

до заданной точности.

Имитатор маршрутов объектов можно использовать для оценивания точности работы системы позиционирования с различными способами размещения точек доступа, а также для определения максимального расстояния между точками доступа в системах внутреннего позиционирования, методы работы которых основаны на комбинированном использовании сигналов от точек доступа и данных от инерциального измерительного модуля.

Приведем пример работы имитатора маршрутов для тестирования Алгоритма 7 определения местоположения объекта по расстояниям от точек доступа с учетом его перемещений. При тестировании алгоритма длина ребер графа составила в среднем 50 метров, скорость движения объекта – 3 м/с. Измерения расстояний до точек доступа происходили раз в 5 секунд. Считалось, что расстояния измерялись только до тех точек доступа, которые находились на одном ребре с мобильным объектом. В качестве измерений использовались расстояния до точек доступа плюс ошибка (равномерно распределенная величина на интервале от 1 до 10 метров). С заданной вероятностью могло происходить событие “потеря сигнала”, тогда считалось, что изменение расстояний было не успешным, и оно не принималось во внимание при расчете местоположения. За местоположение объекта принималась точка на графе, ближайшая к центру масс точек, обозначающих середины отрезков, выдаваемых алгоритмом.

Оценка функции распределения ошибки определения местоположения для данного эксперимента представлена на рисунке 8.

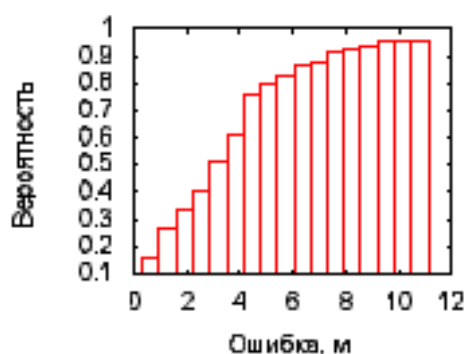


Рис. 8: Функция распределения ошибки определения местоположения для модельного эксперимента.

Как видно, точность определения местоположения в 75% случаев составляет менее 5 метров. Максимальная ошибка определения местоположения может превышать максимальную ошибку в измерении расстояния. Такая ситуация может наблюдаться, если в очередной момент расчета местоположения измерения признаются не успешными (имитация нестабильности радиосвязи), а зона нахождения объекта все равно должна быть расширена вследствие неопределенности направления движения объекта с заранее известной максимальной скоростью.

Среднее время определения местоположения на компьютере Samsung 900x с процессором Intel Core i5 для описанного эксперимента составило 0.8 мс. Максимальное время расчета составило 2 мс.

Рассмотрим пример работы имитатора маршрутов для тестирования Алгоритма 8 привязки траектории к графу. Использовался граф, имеющий более 2000 вершин и более 3000 ребер. Длины звеньев траекторий находились в интервале от 5 до 7 метров. При построении наблюдаемых траекторий моделировались ошибки измерений длин звеньев траектории и углов между звеньями. Относительные систематические ошибки в длинах звеньев находились в интервале от 0 до 0,1. Абсолютные систематические ошибки в углах между звеньями находились в интервале от 0 до 2,5 градусов, а случайные ошибки – в интервале от 0 до 5 градусов. Координаты наблюдаемых траекторий округлялись до целых значений. Длина каждой траектории была равна 300 метрам, всего было проведено 5000 испытаний. Параметр Δd в алгоритме привязки был равен 20 метрам. В результате работы алгоритма привязки траектории ошибка определения местоположения составила в 70 % случаев менее 12 метров, в 80 % – менее 18 метров и в 90 % – менее 28 метров. Время на привязку одной траектории к графу не превышало 1 мс.

Также в главе рассматривается задача определения высоты положения объекта по совокупности показаний датчиков атмосферного давления.

В **пятой главе** описан разработанный программный комплекс, предназначенный для имитации работы системы внутреннего позиционирования.

Для сравнения различных алгоритмов определения местоположения мобильных объектов внутри помещений, алгоритмов оптимальной расстановки точек доступа, алгоритмов автоматической калибровки, по-

иска наилучших значений параметров этих методов, необходим сбор большого объема экспериментальных данных. Проведение соответствующих экспериментов является весьма трудоемкой задачей, требующей для своего решения больших человеческих и временных ресурсов. Так, при определении оптимальных мест расположения точек доступа необходимо многократно менять положение точек доступа. Для каждого положения нужно строить карту уровня сигнала точки доступа во всех зонах помещения. Оператору системы потребуется обойти все зоны, при этом в каждой из них желательно собрать как можно больше измерений.

В качестве альтернативы экспериментам предлагается использовать имитационную модель системы определения местоположения, позволяющую имитировать движение мобильного объекта внутри помещения и распространение радиосигналов, измерять расстояния и уровень сигнала от точек доступа или приемником объекта. Отличительной особенностью представленной в диссертации имитационной системы является возможность тестирования алгоритмов оптимального размещения точек доступа, автоматического построения карт уровня сигналов, имитация движения объекта и подключение дополнительных источников информации, например, датчиков атмосферного давления. Система включает функции визуального представления плана помещения и мест размещения точек доступа, автоматического разбиения плана помещения на множество прямоугольных зон.

В имитационной системе были протестированы разработанные алгоритмы размещения точек доступа и автоматического построения карт уровней сигналов. Тестирование подтвердило работоспособность предложенных методов и адекватность получаемых решений.

Представленные в диссертационном исследовании подходы и алгоритмы были применены при разработке технологии внутреннего позиционирования RealTrac, внедренной на нескольких шахтах и других промышленных объектах и сооружениях.

Заключение

Сформулируем итоги выполненного исследования.

1. Результатом диссертационной работы является комплекс методов моделирования, численных методов и программ, предназначенных

для улучшения технических характеристик систем внутреннего позиционирования, таких как точность определения мобильных объектов, стоимость, удобство работы, устойчивость, энергопотребление.

2. Построена обобщенная математическая модель системы внутреннего позиционирования объектов внутри помещений. В данной модели позициям возможного расположения объекта соответствует дискретное множество элементарных участков X , а каждому датчику беспроводной сети соответствует разбиение множества X на зоны. Местоположение мобильного объекта каждым датчиком определяется с точностью до зоны.
3. Построена математическая модель для задачи определения мест размещения точек доступа системы внутреннего позиционирования. Предложены различные целевые функции для поставленных задач оптимизации. Эксперименты, проведенные в реальных условиях, показали, что оптимальная расстановка точек доступа может существенно улучшить точность определения местоположения мобильных объектов. Так, при разбиении плана помещения на 125 квадратных зон размером 2 на 2 метра и оптимальной расстановке точек доступа в 75 % случаев ошибка не превосходила двух с половиной метров.
4. Проведено теоретическое исследование модели задачи расстановки точек доступа, изучена задача построения разрешающего множества вершин на графе с учетом вероятностного характера определения расстояния между вершинами. Для одного частного случая получена формула для определения отказоустойчивой метрической размерности графа.
5. Разработан алгоритм динамического построения карт уровня сигналов. Карты создаются для добавляемой точки доступа без участия оператора системы определения местоположения в процессе ее эксплуатации. Предложенный метод может быть запущен и для ранее установленных точек доступа для калибровки соответствующих карт уровня сигнала. Проведенные эксперименты показали, что ошибка определения местоположения при использовании автоматически обученной точки доступа не сильно больше, чем при исполь-

зовании станции, обученной вручную. Карта уровня сигнала для автоматически обученной точки доступа и карты уровня сигнала для точки доступа, обученной “вручную” имеют невысокое относительное отличие.

6. Предложен детерминированный эвристический алгоритм привязки к плану помещения трека объекта, получаемого от встроенного модуля распознавания движения. Данный алгоритм можно использовать для уточнения местоположения мобильного объекта. В результате тестовых испытаний при шаге сетки, равному одному метру, средняя ошибка между истинными положениями объекта и рассчитанным составила 0,8 м.
7. Разработана графовая модель для задачи определения местоположения объектов в шахтах. В модели учитывается движение объектов в промежутках времени между измерениями расстояний до объектов от точек доступа. Эксперименты на реальных данных показали, что ошибка определения местоположения в 75% случаев не превышает 5 метров. Разработан метод привязки траектории движения объекта, получаемой от инерциального измерительного модуля, к графу шахты. Предложенный подход может применяться, когда требуется одновременно определять местоположение большого числа объектов в режиме экономии эфира.
8. Для определения высоты объекта предлагается использовать информацию, получаемую от распределенной сети датчиков атмосферного давления. Эксперименты показали, что усреднение данных от трех датчиков атмосферного давления обеспечивает оценку среднеквадратического отклонения, равную 2,45 Па, что соответствует ширине доверительного интервала, равной 38 см при оценке высоты мобильного датчика с надежностью 0,95.
9. Спроектирован, реализован и протестирован комплекс программ, реализующий предложенные алгоритмы определения местоположения объектов в помещениях. Расчет способов размещения точек доступа системы определения местоположения проведен на реальных данных в ходе эксплуатации действующих систем.

10. Создана программная система, имитирующая работу системы внутреннего позиционирования. Данная система предназначена для тестирования различных алгоритмов определения местоположения объектов и подбора параметров их работы. Разработан алгоритм разбиения плана помещения на зоны.
11. Даны рекомендации по применению результатов диссертации. Совместное применение указанные методов (оптимальное расположение точек доступа, автоматическая калибровка карт уровня сигналов, учет модели движения, использование информации, получаемой от датчиков движения, магнитометра и датчиков атмосферного давления) может привести к существенному улучшению качества работы системы определения местоположения объектов в закрытых помещениях и уменьшению ошибки расчета позиции.

Публикации автора по теме диссертации

Публикация в рецензируемом научном издании, индексируемом Web Of Science:

1. Moschevikin, A. RealTrac technology at the EvAAL-2013 competition / A. Moschevikin, R. Voronov et al. // Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments. – 2015. – V. 7. – No. 3. – pp. 353–373.

Публикации в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней:

2. Воронов, Р. В. Задача оптимального размещения точек доступа системы позиционирования объектов в помещении / Р. В. Воронов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2017. – Вып. 1. – С. 61–73.

3. Воронов, Р. В. Применение условной энтропии при формировании рекомендаций по размещению базовых станций в локальных системах позиционирования / Р. В. Воронов, А. П. Мощевикин // Информационные технологии. – 2014. – № 10. – С. 11-16.

4. Воронов, Р. В. Автоматическая калибровка локальных систем позиционирования на основе построения карты сил сигналов / Р. В. Во-

ронов, О. В. Лукашенко, А. П. Мощевикин // Труды Карельского научного центра РАН, – 2014. – № 4. С. 29–35.

5. Воронов, Р. В. Динамическое создание карт уровня WiFi-сигналов для систем локального позиционирования / Р. В. Воронов, С. В. Малодушев // Системы и средства информатики, – 2014. – Т. 24. – № 1. С. 79–91.

6. Воронов, Р. В. Задача привязки траектории объекта к плану помещения / Р. В. Воронов, А. С. Галов, А. П. Мощевикин, А. М. Воронова // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2015. – № 2 (147). – С. 87–91.

7. Воронов, Р. В. Отказоустойчивая метрическая размерность графа ходов шахматного короля / Р. В. Воронов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2017. – Вып. 3. – С. 241–249.

8. Воронов, Р. В. Метод определения местоположения мобильных объектов в шахте / Р. В. Воронов, А. С. Галов, А. П. Мощевикин, А. М. Воронова, Т. В. Стёпкина // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4; URL: <http://www.science-education.ru/118-13876>

9. Воронов, Р. В. Метод обработки данных распределенной сети датчиков давления для оценки относительной высоты мобильного узла / Р. В. Воронов, А. С. Волков, С. А. Региня, А. А. Федоров, А. П. Мощевикин // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4; URL: <http://www.science-education.ru/110-9631>.

10. Малодушев, С. В. Определение оптимальных путей эвакуации из здания / С. В. Малодушев, Р. В. Воронов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10-3. – С. 495–502.

11. Малодушев, С. В. Математическая модель эвакуации людей из зданий в экстренных ситуациях / С. В. Малодушев, Р. В. Воронов, Е. В. Абрамов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2016. – № 6. – С. 29–40.

12. Щеголева, Л. В. Построение дорожного графа для маршрутизации мобильного робота в замкнутой системе коридоров / Л. В. Щеголева, Р. В. Воронов // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 37. – № 3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3168>

13. Рогов, А. А. Задача выбора битовых скоростей медиапоток / А. А. Рогов, Р. В. Воронов, Е. А. Петров // Вестник Воронежского

государственного технического университета. – 2017. – Т. 13. – №1. – С. 18–21.

14. Воронова, А. М. Моделирование схемы волоков при помощи покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом / А. М. Воронова, Р. В. Воронов, М. А. Пискунов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. “Естественные и технические науки”. – 2012. – № 2 (123). – С. 114–117.

15. Воронова, А. М. Задача покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом и ее приложение для оптимального проектирования схем волоков на лесосеках / А. М. Воронова, Р. В. Воронов, М. А. Пискунов // Информатика и системы управления. – 2012. – № 1 (31). – С. 56–64.

Публикации в сборниках конференций, индексируемых Scopus:

16. Galov, A. S. Combination of RSS localization and ToF ranging for increasing positioning accuracy indoors / A. S. Galov, A. P. Moschevikin, R. V. Voronov // Proceedings of the 11th International Conference on ITS Telecommunications ITST-2011, – pp. 299–304.

17. Moschevikin, A. Using Pressure Sensors for Floor Identification in Wireless Sensors Networks / A. Moschevikin, R. Voronov, A. Galov, A. Soloviev // Proceedings of the 1st IEEE International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems IDAACS-SWS, Offenburg, Germany, September 20–21, – 2012, – pp. 2–6.

Публикации в сборниках научных трудов:

18. Сорокин, Ф. В. Методы решения задачи привязки трека к плану помещения / Ф. В. Сорокин, Р. В. Воронов // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 6-2 (50). – С. 19–28.

Публикации в материалах международных и всероссийских конференций и форумов:

19. Воронов, Р. В. Развитие технологий локации объектов в беспроводных системах / Р. В. Воронов // В сборнике: Классический университет в пространстве трансграничности на Севере Европы: стратегия инновационного развития. Материалы Международного форума. – Петрозаводский государственный университет. – 2014. – С. 16–17.

20. Воронов, Р. В. Задача оптимального расположения базовых станций системы локации в помещениях / Р. В. Воронов, В. В. Бурлакова // В сборнике: Научно-образовательная информационная среда XXI века.

Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. – 2015. – С. 46–48.

21. Воронов, Р. В. Обобщенная задача локации мобильных объектов в помещениях / Р. В. Воронов // В сборнике: Инновационные технологии в науке и образовании. Материалы III международной научно-практической конференции. – Чебоксары. – 2015. – № 3. – С. 183–185.

22. Воронов, Р. В. Обобщение задачи определения метрической размерности графа / Р. В. Воронов // В сборнике: Вероятностные методы в дискретной математике. Материалы IX Международной Петрозаводской конференции. – Петрозаводск. – 2016. – С. 20–22.

23. Малодушев, С. В. Математическая модель эвакуации людей из здания / С. В. Малодушев, Р. В. Воронов // В сборнике: Вероятностные методы в дискретной математике. Материалы IX Международной Петрозаводской конференции. Петрозаводск. – 2016. – С. 47–49.

24. Андреева, И. С. Эвристический алгоритм расстановки базовых станций системы локации объектов в помещении / И. С. Андреева, Р. В. Воронов // В сборнике: Научно-образовательная информационная среда XXI века. Материалы X Всероссийской научно-практической конференции. – Петрозаводск. – 2016. – С. 4–6.

25. Чаженгин, Г. А. Исследование беспроводных систем и технологий позиционирования внутри помещений / Г. А. Чаженгин, Р. В. Воронов // В сборнике: Научно-образовательная информационная среда XXI века. Материалы X Всероссийской научно-практической конференции. – Петрозаводск. – 2016. – С. 166–169.

26. Петров, Е. А. Оптимизационная модель выбора битовых скоростей медиа-потокa / Е. А. Петров, А. А. Рогов, Р. В. Воронов // В сборнике: Научно-образовательная информационная среда XXI века. Материалы X Всероссийской научно-практической конференции. – Петрозаводск, – 2016. – С. 131–134.

27. Малодушев, С. В. Вероятностная модель на графе для задачи оптимальной расстановки базовых станций системы локации / С. В. Малодушев, Р. В. Воронов, Е. В. Абрамов // В сборнике: Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий. Материалы IX международной конференции (ПМТУКТ-2016). – Воронеж, – 2016. – С. 218–221.

28. Малодушев, С. В. Моделирование эвакуации из зданий лю-

дей различных групп мобильности / С. В. Малодушев, Р. В. Воронов, А. А. Рогов // В сборнике: Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий. Материалы IX международной конференции (ПМТУКТ-2016). – Воронеж, 2016. – С. 221–225.

29. Воронов, Р. В. О подходах к задаче расстановки базовых станций для внутренних систем позиционирования / Р. В. Воронов, О. В. Лукашенко // В сборнике: Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь. Материалы XIX международной научной конференции (DCCN-2016). Том 1. Архитектура, методы управления, моделирования и проектирования компьютерных сетей. Москва, 2016. С. 181–184.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

30. Покровская, О.О. Программа определения мест размещения базовых станций и построения карт уровня сигналов в локальных системах позиционирования / О. О. Покровская, Р. В. Воронов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: Петрозаводский государственный университет. Свидетельство № 2014619815. Заявка № 2014617433. Дата поступления 25.07. 2014. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.09.2014

31. Малодушев, С. В. Программа сканнер беспроводных Wi-Fi сетей / С. В. Малодушев, Р. В. Воронов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: Петрозаводский государственный университет. Свидетельство № 2015619990. Заявка № 2015617195. Дата поступления 04.08.2015. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.09.2015.

32. Сорокин, Ф. В. Программа для тестирования алгоритмов привязки трека к плану помещения / Ф. В. Сорокин, Р. В. Воронов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: Петрозаводский государственный университет. Свидетельство № 2015660321. Заявка № 2015617204. Дата поступления 04.08.2015. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.09.2015.

33. Тимофеева, И. С. Программа оптимизации расположения точек доступа на графе / И. С. Тимофеева, Р.В. Воронов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: Петрозаводский государственный университет. Свидетельство №

2015660455. Заявка № 2015617194. Дата поступления 04.08.2015. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30.09.2015.

34. Андреева, И. С. Программа оптимальной расстановки базовых станций системы локации в помещении / И. С. Андреева, Р. В. Воронов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: Петрозаводский государственный университет. Свидетельство № 2016660258. Заявка № 2016617511. Дата поступления 12.07.2016. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.09.2016.

35. Бурлакова, В. В. Программа для определения оптимального размещения точек доступа системы локации с учетом погрешности измерений / В. В. Бурлакова, Р. В. Воронов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: Петрозаводский государственный университет. Свидетельство № 2016660279. Заявка № 2016617600. Дата поступления 12.07.2016. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.09.2016.

36. Сорокин, Ф. В. Реализация фильтра частиц для привязки трека объекта к плану помещения / Ф. В. Сорокин, Р. В. Воронов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: Петрозаводский государственный университет. Свидетельство № 2016660280. Заявка № 2016617596. Дата поступления 12.07.2016. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.09.2016.

37. Стёпкина, Т. С. Программа локации мобильных объектов на графе / Т. С. Стёпкина, Р. В. Воронов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: Петрозаводский государственный университет. Свидетельство № 2017612248. Заявка № 2016664625. Дата поступления 28.12.2016. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17.02.2017.

38. Малодушев, С. В. Эмулятор процесса эвакуации / С. В. Малодушев, Е. В. Абрамов, Р. В. Воронов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: Петрозаводский государственный университет. Свидетельство № 2017612074. Заявка № 2016664534. Дата поступления 28.12.2016. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.02.2017.