

На правах рукописи



Лукша Сергей Сергеевич

**АЛГОРИТМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КАРТИНЫ
ОБЛАСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА
ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 05.11.16

«Информационно-измерительные и управляющие системы
(в технических системах)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет»
на кафедре «Информационно-измерительная и биомедицинская техника»

Научный руководитель:

Борисов Александр Григорьевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «РГРТУ»

Официальные оппоненты:

Нефедьев Дмитрий Иванович,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «Пензенский государственный универ-
ситет», зав. кафедрой «Информационно-
измерительная техника и метрология»

Акименко Татьяна Алексеевна,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет», доцент кафедры «Робототех-
ника и автоматизация производства»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет»

Защита состоится 2 марта 2018 г. в 12.00 на заседании диссертационного
совета Д212.211.04 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехниче-
ский университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ»
и на сайте www.rsreu.ru.

Автореферат разослан «___»_____20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Возможность функционирования в неструктурированной среде как фактор автономности мобильного робота (МР) требует использования в его составе развитой бортовой информационно-измерительной системы (БИИС). В задачи этой системы входит предоставление данных для оценки параметров перемещения в области функционирования (ОФ), оценки параметров окружающих объектов, траекторного управления и т.д. В условиях полного или частичного отсутствия априорной информации об объектах среды повышается актуальность задачи формирования пространственных картин ОФ, сопряженной с оценкой относительного положения робота.

Одним из ключевых датчиков в современных МР является лазерный сканирующий дальномер высокого разрешения (ЛСДВР), преимуществами которого являются: высокая точность и частота получаемых измерений, широкий диапазон рабочих условий, устойчивость к электромагнитным воздействиям. Использование информации с ЛСДВР целесообразно не только в интересах оценки параметров объектов ОФ, но и для определения относительного перемещения МР, что особенно актуально при функционировании внутри помещений или в городской местности.

Таким образом, актуальность разработки алгоритмов БИИС мобильного робота обоснована следующими факторами:

- необходимостью калибровки БИИС со сканирующими датчиками, не требующей специальных лабораторных условий или особых типов ОФ;
- необходимостью получения пространственных картин высокой детализации, совмещённых на основе частных измерений с различных положений МР для оценки параметров объектов ОФ;
- потребностью в оценке пространственного положения МР в условиях низкой и нестабильной точности измерительной информации с инерциальных и спутниковых навигационных систем для формирования состоятельных обобщённых пространственных картин;
- требованием минимизации геометрических искажений пространственных картин, полученных при движении МР;
- необходимостью оценки точности полученных средствами БИИС данных.

Степень разработанности темы. Вопросами проектирования МР, их информационно-измерительных и управляющих систем занимались российские и зарубежные ученые: В.П. Андреев, В.Л. Афонин, С.А. Воротников, Е.А. Деянин, М.Б. Игнатъев, П.Д. Крутько, Ю.В. Подураев, Л.Б. Рапопорт, А.М. Формальский, Н. Asada, Y. Kuwata, M. Liu, A. Nüchter, S. Thrun, A. Waj-Fraj, A. West и др. Среди основных научных коллективов, занимающихся созданием алгоритмов для обработки данных с ЛСДВР можно выделить МГТУ им. Н.Э.Баумана в лице И.В. Рубцова, В.П. Носкова, А.А. Ханина, и др. и Южный федеральный университет в лице В.Х. Пшихопова, М.Ю. Медведева и др.

В зарубежных научных работах вопрос анализа измерительной информации с лазерных сканирующих дальнометров высокого разрешения освещается достаточно широко. Однако отмечается незначительное количество работ, в которых рассмотрен вопрос сопоставления частных пространственных картин, формируемых на основе измерений с ЛСДВР без использования информации с других типов датчиков. В частности, итеративный алгоритм ближайших точек (*Iterative Closest Points, ICP*), основанный на последовательном уточнении взаимного расположения двух пространственных картин в этой работе, рассматривается в качестве базового и используется для сравнительного анализа с предлагаемым алгоритмом.

Цель диссертационной работы состоит в создании алгоритмов обработки измерительной информации с ЛСДВР, позволяющих формировать пространственные картины ОФ и одновременно получать информацию о перемещении МР при наличии видимых для ЛСДВР ориентиров без использования данных с других типов датчиков.

Задачи работы

1. Разработка алгоритма калибровки измерительной системы, в состав которой входит ЛСДВР, основанного на оценке параметров пространственного положения сканирующего датчика.
2. Разработка алгоритмов формирования обобщенных пространственных картин с одновременной оценкой параметров пространственного перемещения МР на основе измерительной информации с ЛСДВР.
3. Повышение робастности совмещения частных пространственных картин за счёт применения многоэтапного алгоритма.
4. Разработка алгоритма для оценки точности параметров БИИС МР, позволяющего определить эффективность средств обработки измерительной информации.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались: методы математического моделирования, методы численного решения уравнений с применением ПЭВМ, методы цифровой обработки сигналов, методы аналитической геометрии и распознавания примитивов, теории автоматического управления.

Научная новизна

1. Разработан и исследован алгоритм калибровки измерительной системы, состоящей из ЛСДВР на подвижной части МР, отличающийся использованием детерминированной сцены с простой моделью шаблона.
2. Предложен и реализован комплексный алгоритм формирования обобщенной пространственной картины с одновременным получением информации о перемещении МР на основе данных ЛСДВР. Отличительными особенностями алгоритма являются способность обрабатывать измерения с ЛСДВР, имеющего неравномерное горизонтальное и вертикальное угловое разрешение, а также способность осуществлять совмещение без использования данных бортовых навигационных систем.
3. Предложена и реализована модификация итеративного алгоритма бли-

жайших точек, отличающаяся способностью совмещать пространственные картины в режиме реального времени.

4. Предложена и реализована процедура оценки точности БИИС МР, отличающаяся способностью проводить независимую оценку средств обработки измерительной информации за счёт получения опорных данных о параметрах перемещения МР.

Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментальными исследованиями, проведёнными для каждого из предложенных алгоритмов.

Практическая значимость работы

1. Разработанный алгоритм калибровки измерительной системы использован при инициализации параметров модуля картографирования для МР, а также при реализации сканирующей системы на базе робототехнического манипулятора.

2. На основе предложенных алгоритмов обработки измерительной информации разработано программное обеспечение (ПО) для МР, позволяющее осуществлять сбор, предварительный анализ, совмещение и визуализацию полученных данных с ЛСДВР.

3. Разработанная процедура оценки точности БИИС МР была использована для тестирования систем оценки местоположения МР в ОФ внутри помещения и позволила сделать выводы об их эффективности.

Внедрение результатов работы. Результаты работы были использованы в АО ВНИИ «Сигнал», а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм калибровки измерительной системы МР, имеющей в составе ЛСДВР, позволяющий оценивать параметры пространственной трансформации сопряжённых элементов с абсолютной погрешностью не более 0,003 м по линейной трансформации и 0,002 рад по угловой.

2. Комплексный алгоритм обработки измерительной информации с ЛСДВР, позволяющий определять положение частных пространственных картин с точностью в 8-10 раз выше, чем базовый алгоритм.

3. Алгоритм оценки скорости МР на основе измерений с ЛСДВР, позволяющий устранить геометрические искажения в формируемой пространственной картине до 3-х раз эффективнее, чем базовый алгоритм.

4. Процедура оценки точности данных БИИС МР, позволяющая получить параметры ошибки позиционирования МР, отличающиеся от реальных не более чем на 25 %, что до 2-х раз эффективнее систем оценки на основе видеопозиционирования.

Апробация работы проведена в форме научных докладов, дискуссий по основным результатам диссертационной работы, а также в форме испытаний, в том числе: Всероссийская НТК «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2013 г.); соревнования автоматизированных транспортных средств «Робокросс-2013», «Робокросс-2014», «Робокросс-2015»,

«Робокросс-2016» на полигоне автозавода ГАЗ «Березовая пойма» (г. Нижний Новгород, 2013 – 2016 гг.), Всероссийская НТК «Математические методы в технике и технологиях» (Рязань, 2015 г.), Международная НТК «Mediterranean Embedded Computing Resources 2016» (Бар, Черногория, 2016 г.), международные испытания робототехнических систем «ELROB-2014» (Варшава, Польша, 2014 г.) и «ELROB-2016» (Эгендорф, Австрия, 2016 г.).

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, представлена на 135 страницах и содержит 106 рисунков и 112 наименования списка литературы.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 15 работ, из них – 8 статей из списка изданий, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в международных изданиях, 1 статья в научных сборниках и журналах, 4 тезиса докладов на конференциях, а также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619451.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, проанализировано состояние проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблем разработки БИИС МР, методам калибровки измерительных систем на базе ЛСДВР.

В настоящей работе предложено использовать стандарт систем координат ENU (*Earth, North, Up*). Формат данных с ЛСДВР имеет вид $\{r, a, \varphi, \psi, \chi, t\}$, где r – измеренная дальность до объекта, a – интенсивность отражённого сигнала, φ – угол поворота лазерного сканирующего модуля (ЛСМ) относительно оси OX , ψ – угол поворота ЛСМ относительно оси OY , χ – угол поворота ЛСМ относительно оси OZ , t – момент времени получения измерения. Для каждого измерения пространственной картины координаты точки вычислялись как

$$\mathbf{p} = R_z(\chi)R_y(\psi)R_x(\varphi)T_x(r), \quad (1)$$

где $\mathbf{p}$ – вектор-столбец с координатами искомой точки $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$, $R_z(\chi)$ – матрица

поворота вокруг оси OZ на угол χ , $R_y(\psi)$ – матрица поворота вокруг оси OY на угол ψ , $R_x(\varphi)$ – матрица поворота вокруг оси OX на угол φ , $T_x(r)$ – вектор перемещения координат точки в пространстве.

Отмечена важность минимизации систематической погрешности измерений, получаемых ЛСДВР, размещённым на МР, одним из ключевых компонентов которой является неточность параметров пространственной трансформации при сопряжении двух компонентов. Используя данные об изменении пространственного положения ЛСДВР и полученные измерения расстояния, предлагаем осуществлять калибровку такой системы согласно следующему алгоритму.

Алгоритм калибровки измерительной системы МР, имеющей в составе ЛСДВР

Шаг 1. Получение измерений путём сканирования сцены, содержащей калибровочный шаблон модели «плоскость».

Шаг 2. Выделение области пространства, содержащей калибровочный шаблон и не содержащей другие объекты.

Шаг 3. Оценка параметров модели плоскости по полученной пространственной картине алгоритмом RANSAC.

Шаг 4. Вычисление значения целевой функции вида

$$E(A, B, C, D) = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \frac{|Ax_i + By_i + Cz_i + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \quad (2)$$

где n_p – количество точек в сформированной пространственной картине, A, B, C, D – параметры модели плоскости, полученной с использованием алгоритма RANSAC, x_i, y_i, z_i – координаты для каждого i -го исследуемого измерения. Вид целевой функции обоснован требованием определить близость выбранной модели шаблона и имеющегося множества измерений в виде пространственной картины.

Шаг 5. Оптимизация значений параметров пространственного положения ЛСДВР.

Шаг 6. Если значение целевой функции не достигло требуемого минимума, – повторить шаги 3-5. Иначе полученные параметры считаются оптимальными.

Конец алгоритма

Экспериментальные исследования алгоритма калибровки проводились с использованием лазерного сканера Hокую URG-04LX и манипулятора Kuka YouBot на смоделированных идеальных и зашумлённых данных, а также на реальных данных. При моделировании были получены множества измерений, соответствующие пространственным картинам с шаблонами типа плоскость для трёх моделей: $x = 0.6$, $y = 0.6$ и $z = 1$. Для каждого режима была построена графическая зависимость значения целевой функции от значения параметра, пример которых показан на рисунке 1.

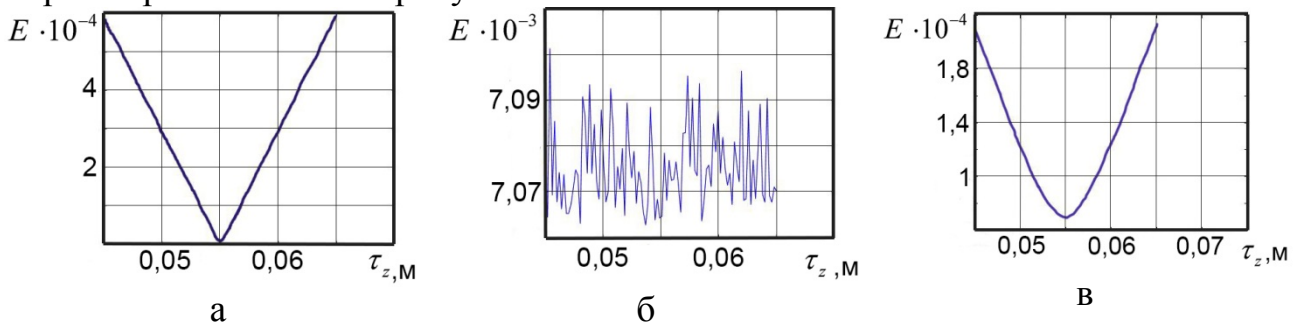


Рисунок 1 – Зависимости целевой функции алгоритма калибровки:

а – идеальные смоделированные данные, б – зашумлённые смоделированные данные для неэффективного режима сканирования, в – зашумлённые смоделированные данные для эффективного режима сканирования

Для эксперимента использовался шум с нормальным распределением $N(\mu, \sigma^2)$ с параметрами $\mu = 0$ и $\sigma = 0,01$ м. В отличие от идеальных данных эксперимент на зашумлённых данных не всегда позволял однозначно оценить минимум целевой функции, что показано на рисунке 1, б. Анализ диапазона значений целевой функции в окрестностях минимума (на интервале $\pm 0,01$ м, $\pm 0,01$ рад от реального значения параметра, рисунок 2) позволил сделать вывод об эффективности различных режимов калибровки (таблица 1).

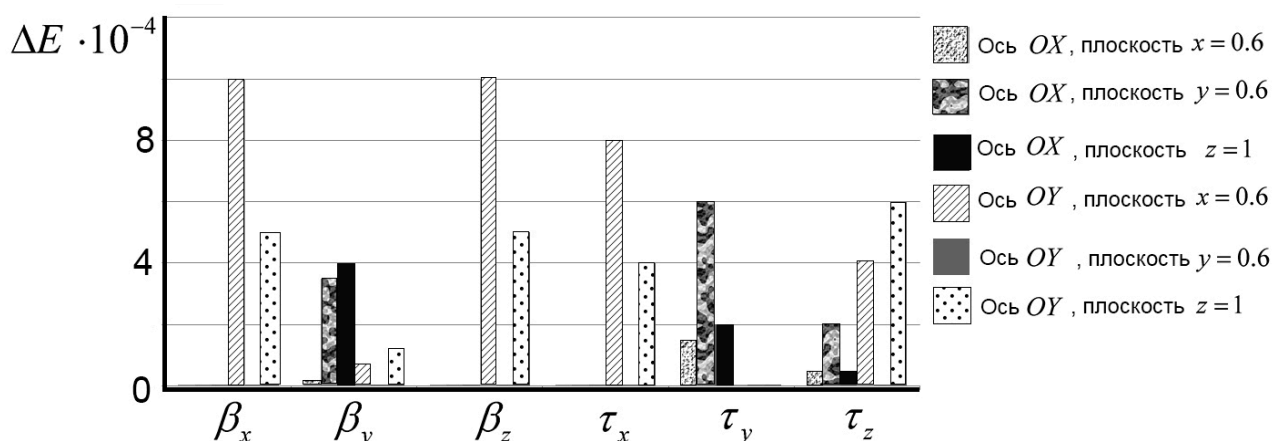


Рисунок 2 – Диапазон значений целевой функции ΔE в окрестностях минимума при различных режимах сканирования для каждого из оптимизируемых параметров

Таблица 1 – Эффективные режимы сканирования в алгоритме калибровки измерительной системы с ЛСДВР на подвижной части МР

Параметр	Эффективные режимы сканирования: вращение вокруг оси, использование плоскости заданного типа	Отклонение оценки на смоделированных данных
β_x	Ось OY с использованием плоскости типа $x = 1$	0,002 рад
β_y	Ось OX с использованием плоскости типа $y = 1$	0,001 рад
β_z	Ось OY с использованием плоскости типа $x = 1$	0,001 рад
$\tau_{x_{ls}}$	Ось OY с использованием плоскости типа $x = 1$	0,003 м
$\tau_{y_{ls}}$	Ось OX с использованием плоскости типа $y = 1$	0,001 м
$\tau_{z_{ls}}$	Ось OX с использованием плоскости типа $y = 1$	0,001 м

Как следует из таблицы 1, полученные суммарные среднеквадратические отклонения (СКО) от реальных значений составляют не более 0,003 м по линейной трансформации и не более 0,002 рад по угловой.

Калибровка сканирующей системы с использованием реальных пространственных картин ОФ осуществлялась в два этапа. На первом этапе проводилась последовательная минимизация по каждому из параметров для определения начальных приближений. На втором этапе проводилась многокритериальная оптимизация с использованием стратегии взвешенных сумм. В качестве

критериев использовались значения целевой функции, полученные для двух эффективных режимов сканирования. По итогам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- разработанный алгоритм калибровки БИИС на основе ЛСДВР функционирует с суммарным СКО не более 0,003 м по линейной трансформации и не более 0,002 рад по угловой, при этом СКО ЛСДВР составляло не более 0,01 м;
- вышеуказанные характеристики алгоритмом калибровки измерительной системы достигаются без использования специализированных средств измерений и высококачественных шаблонов.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию комплексного алгоритма обработки измерительной информации с ЛСДВР для сопоставления пространственных картин ОФ МР. Задача алгоритма – для множеств P_b и P_c определить параметры вращения R и перемещения τ , при котором справедливо выражение

$$P_c = RP_b + \tau. \quad (3)$$

Ввиду неточного совпадения областей отражения лазерного излучения при сканировании с разных местоположений МР задача комплексного алгоритма сопоставления сводится к минимизации функции вида

$$E(R, \tau) = \sum_i \left\| \mathbf{p}_{c,i} - (R\mathbf{p}_{b,i} + \tau) \right\|_{L_2}, \quad (4)$$

где $\mathbf{p}_{b,i}$ и $\mathbf{p}_{c,i}$ – элементы множеств P_b и P_c , определённые как взаимосоответствующие.

Комплексный алгоритм сопоставления пространственных картин состоит из уточняющих этапов (рисунок 3).

Этап 1. Парное сопоставление: каждая последовательно полученная картина совмещается с предыдущей картиной.

Этап 2. Стягивание: каждая последовательно полученная картина совмещается с базовой, которая используется до тех пор, пока количество соответствующих точек выше заданного порога; в противном случае роль базовой картины переходит к последней успешно сопоставленной картине.

Этап 3. Сопоставление в пределах заданного окна, когда текущая картина совмещается с набором картин заданного окна.

Этап 4. Глобальная коррекция, т.е. уточнение параметров трансформации для каждой частной картины на всём имеющемся наборе картин.

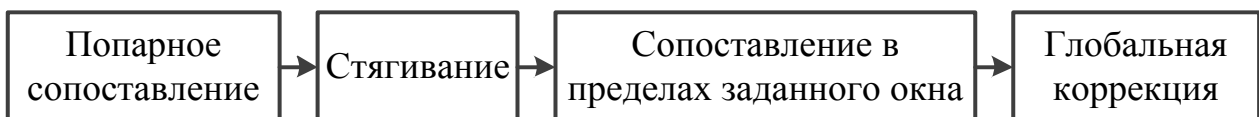


Рисунок 3 – Общая структура предложенного комплексного алгоритма сопоставления пространственных картин ОФ

На каждом из этапов сопоставления пространственных картин оценка их пространственной трансформации осуществляется с использованием следующего алгоритма.

Алгоритм сопоставления

Шаг 1. Получение измерений в виде пространственных картин.

Шаг 2. Фильтрация измерений в соответствии с заданными параметрами.

Шаг 3. Выделение измерений, наиболее эффективных для оценки параметров сопоставления.

Определение количественного показателя важности измерений для процесса сопоставления с учётом неравномерного вертикального и горизонтального углового разрешения ЛСДВР предложено проводить следующим образом. Пусть $P_{b,i}$ – подмножество P_b , включающее измерения, полученные с помощью единичного ЛСМ, $N_{b,i}$ – количество измерений, полученное ЛСМ в одной пространственной картине, которое определим с использованием соотношения

$$N_{b,i} = \frac{N_p}{lsn}, \quad (5)$$

где lsn – количество ЛСМ в используемом ЛСДВР, N_p – количество измерений в частной пространственной картине. Выберем исследуемую точку с координатами $\mathbf{p}_j$, такую что $\mathbf{p}_j \in P_{b,i}$, $j > lsn$ и $j < N_{b,i} - lsn$, а также соседние с ней точки с координатами $\mathbf{p}_{j-1}$, $\mathbf{p}_{j+1}$, $\mathbf{p}_{j-lsn}$, $\mathbf{p}_{j+lsn}$. Наличие в ОФ монотонных объектов (стены, поверхность дороги и т.д.) не позволяет эффективно оценить относительное перемещение МР. Для выделения измерений, относящихся к граничным (т.е. немонотонным) областям объектов, количественный показатель важности должен отражать величину угла, образованного триадой точек с координатами $\{\mathbf{p}_{j-1}, \mathbf{p}_j, \mathbf{p}_{j+1}\}$ и $\{\mathbf{p}_{j-lsn}, \mathbf{p}_j, \mathbf{p}_{j+lsn}\}$. На рисунке 4 схематически представлен частный случай окрестности исследуемой точки с координатами $\mathbf{p}_j$, которая является немонотонной и должна быть выделена среди соседних.

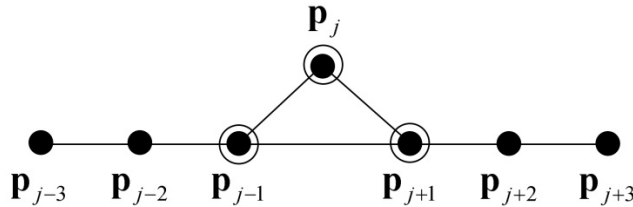


Рисунок 4 – Схематическое изображение измерений с ЛСМ, спроецированных на плоскость и соединённых линиями по кратчайшему расстоянию

Для определения количественного показателя важности использовались расстояния между координатами точек триады $d_{j,j-1} = \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{j-1}\|$, $d_{j,j+1} = \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{j+1}\|$, $d_{j-1,j+1} = \|\mathbf{p}_{j-1} - \mathbf{p}_{j+1}\|$, $d_{j,j-lsn} = \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{j-lsn}\|$, $d_{j,j+lsn} = \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{j+lsn}\|$, $d_{j-lsn,j+lsn} = \|\mathbf{p}_{j-lsn} - \mathbf{p}_{j+lsn}\|$, а для вычисления использовались следующие соотношения:

$$I_{j,hor} = \frac{\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{j-1}\| + \|\mathbf{p}_{j+1} - \mathbf{p}_j\| - \|\mathbf{p}_{j+1} - \mathbf{p}_{j-1}\|}{\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{j-1}\| + \|\mathbf{p}_{j+1} - \mathbf{p}_j\|} = 1 - \frac{d_{j+1,j-1}}{d_{j,j-1} + d_{j,j+1}},$$

$$I_{j,ver} = \frac{\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{j-lsn}\| + \|\mathbf{p}_{j+lsn} - \mathbf{p}_j\| - \|\mathbf{p}_{j+lsn} - \mathbf{p}_{j-1}\|}{\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{j-lsn}\| + \|\mathbf{p}_{j+lsn} - \mathbf{p}_j\|} = 1 - \frac{d_{j+lsn,j-lsn}}{d_{j,j-lsn} + d_{j,j+lsn}}, \quad (6)$$

$$I_j = \sqrt{I_{j,ver}^2 + I_{j,hor}^2},$$

где $I_{j,hor}$ – показатель важности в горизонтальной плоскости, $I_{j,ver}$ – показатель важности в вертикальной плоскости, I_j – обобщённый показатель важности. Для рассматриваемой точки с координатами $\mathbf{p}_j$ показатель $I_{j,hor}$ будет иметь наибольшее значение среди рассматриваемых точек, поскольку $d_{j,j-1} + d_{j,j+1} > d_{j-1,j+1}$. Таким образом, измерения, относящиеся к граничным областям объектов, максимизируют выбранный показатель важности.

Шаг 4. Поиск соответствующих точек из сопоставляемых картин с использованием k -мерного дерева. Пороговое значение расстояния определяется согласно выражению

$$d_{tr} = d_{\min} + \alpha_1 \bar{d} \cdot \exp(\alpha_2 n_{iter}), \quad (7)$$

где d_{tr} – значение порогового расстояния, $d_{\min}$ – минимальное значение порогового расстояния, $\bar{d}$ – среднее расстояние между соответствующими точками при последней итерации сопоставления, n_{iter} – номер текущего повторения, α_1 – коэффициент пропорциональности, определяющий превышение порога над фактическими значениями расстояния между соответствующими точками, α_2 – коэффициент, определяющий скорость уменьшения расстояния, $\alpha_2 < 0$. При $\|\mathbf{p}_{b,i} - \mathbf{p}_{c,i}\| \leq d_{tr}$ рассматриваемые точки являются соответствующими. Использование пороговой функции такого вида обосновано необходимостью сужения области поиска соответствующих точек, что позволяет уточнять параметры положения пространственной картины на каждом повторении.

Шаг 5. Вычисление центроидов среди полученных координат соответствующих точек.

Шаг 6. Вычисление корреляционной матрицы для несмещённого множества координат соответствующих точек.

Шаг 7. Оценка параметров трансформации, минимизирующих суммарное расстояние [выражение (4)] с использованием сингулярного разложения.

Шаг 8. Если значение суммарного расстояния больше заданного порога, повторить шаги 4-7. Если значение суммарного расстояния меньше или равно заданному порогу, завершить алгоритм.

Конец алгоритма

Обоснован алгоритм оценки скорости МР на основе измерений с ЛСДВР, позволяющий осуществить коррекцию геометрических искажений простран-

ственной картины, возникающих при движении МР в ходе сканирования. Вводится понятие скорости соответствия (СкС), под которым подразумевается значение скорости МР, определённое на основе полученных пар координат соответствующих точек в ходе сопоставления.

Алгоритм оценки скорости МР на основе измерений с ЛСДВР

Шаг 1. Формирование множеств соответствующих точек $P_{c,cor}$ и $P_{b,cor}$ с координатами $\mathbf{p}_{b,j} \in P_{b,cor}$ и $\mathbf{p}_{c,j} \in P_{c,cor}$, а также множеств моментов времени $t_{b,j} \in T_b$ и $t_{c,j} \in T_c$, $j = 1, \dots, N_{cor}$, в которые были получены рассматриваемые измерения.

Шаг 2. Вычисление линейной СкС согласно выражениям

$$v_{tx,j} = \frac{\mathbf{p}_{c,j,x} - \mathbf{p}_{b,j,x}}{t_{c,j} - t_{b,j}}, \quad v_{ty,j} = \frac{\mathbf{p}_{c,j,y} - \mathbf{p}_{b,j,y}}{t_{c,j} - t_{b,j}}, \quad v_{tz,j} = \frac{\mathbf{p}_{c,j,z} - \mathbf{p}_{b,j,z}}{t_{c,j} - t_{b,j}}, \quad (8)$$

где $v_{tx,j}, v_{ty,j}, v_{tz,j}$ – линейная СкС по каждому из параметров для j -го соответствия, $\mathbf{p}_{c,j,x}$ – значение координаты x для соответствующей точки с индексом j из множества $P_{c,cor}$, $\mathbf{p}_{b,j,x}$ – значение координаты x для соответствующей точки с индексом j из множества $P_{b,cor}$.

Шаг 3. Оценка полученных СкС согласно имеющимся ограничениям в двух категориях: ограничения первой категории связаны с физическими возможностями МР; ограничения второй категории связаны с текущими параметрами движения МР и невозможностью мгновенно изменить скорость движения. Отклонение значений, не удовлетворяющих ограничениям.

Шаг 4. Составление диаграммы СкС, где для каждого интервала времени от $t_{b,j}$ до $t_{c,j}$ имеют место значения СкС $v_{tx,j}$, $v_{ty,j}$ и $v_{tz,j}$.

Шаг 5. Для каждого момента времени определяется значение скорости МР по каждому из измерений на основе среднего среди СкС, действующих в этот момент времени.

Конец алгоритма

Проведены экспериментальные исследования комплексного алгоритма сопоставления пространственных картин. Для оценки точности определения пространственного положения было проведено исследование с использованием реальных данных, полученных с ЛСДВР Velodyne HDL-32E, установленного на МР Газель «Бизнес». Сбор измерений осуществлялся на прилегающей к Рязанскому государственному радиотехническому университету территории. МР перемещался по траекториям с совпадающими точками старта и финиша. Суммарная ошибка возврата МР в точку старта составляет не более 0,1 м. В качестве критерия оценки точности комплексного алгоритма сопоставления пространственных картин использовалось расстояние между начальной и конечной позициями маршрута, вычисленными предложенным алгоритмом. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты эксперимента по оценке комплексного алгоритма сопоставления при передвижении МР по замкнутой траектории

№ п/п	Длина пройденного пути, м	Расстояние между стартовой и финишной точками траектории после сопоставления, м		
		Базовый алгоритм	Комплексный алгоритм с коррекцией в пределах заданного окна	Комплексный алгоритм с глобальной коррекцией
1	118,5	3,34	0,24	0,12
2	194,4	8,08	0,45	0,06
3	482,15	28,03	9,22	1,26

Проведены экспериментальные исследования, направленные на оценку робастности комплексного алгоритма сопоставления пространственных картин к появлению динамических объектов в ОФ и изменении погрешности в измерениях. В качестве критерия оценки выбрано отклонение длин пройденного пути, оцененных алгоритмами сопоставления пространственных картин при отсутствии и наличии указанных дестабилизирующих факторов. Для моделирования пространственной картины с динамическим объектом к заданному количеству n_{dyn} измерений, полученных с ЛСДВР, применялась трансформация вида

$$\mathbf{p}_i \rightarrow \mathbf{p}_{do,i}, \mathbf{p}_{do,i} = \begin{bmatrix} x_i + v_{do,x} t_i \\ y_i + v_{do,y} t_i \\ z_i + v_{do,z} t_i \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $\mathbf{p}_{do,i}$ – координаты i -й точки динамического объекта, $i = 1, \dots, n_{dyn}$, $v_{do,x}, v_{do,y}, v_{do,z}$ – скорость динамического объекта, определяемая в ходе моделирования. Для оценки влияния погрешности в измерениях использовался шум с нормальным распределением $N(\mu, \sigma^2)$ с параметрами $\mu = 0$ и $\sigma = 0,01 \dots 1$ м. В результате экспериментов показано, что значение выбранного критерия, полученного предложенным алгоритмом комплексного сопоставления, в 4 раза ниже, чем значение аналогичного параметра у базового алгоритма, что подтверждает повышенную робастность предложенного алгоритма.

Для исследования алгоритма оценки скорости МР по данным ЛСДВР в составе БИИС использовались смоделированные множества измерений с Velodyne HDL-32E. Использование алгоритма на основе СкС позволило существенно снизить влияние равноускоренного движения на формируемую пространственную картину. На рисунке 5 показаны зависимости оценки скорости МР на основе базового алгоритма сопоставления и с использованием алгоритма на основе СкС в сравнении с реальными (опорными) данными. Анализ показал, что для предложенного алгоритма показатель среднеквадратического отклонения составил $\sigma_{cs} = 1,16$, в то время как для базового алгоритма он составил $\sigma_c = 5,78$, что более чем в 3 раза выше.

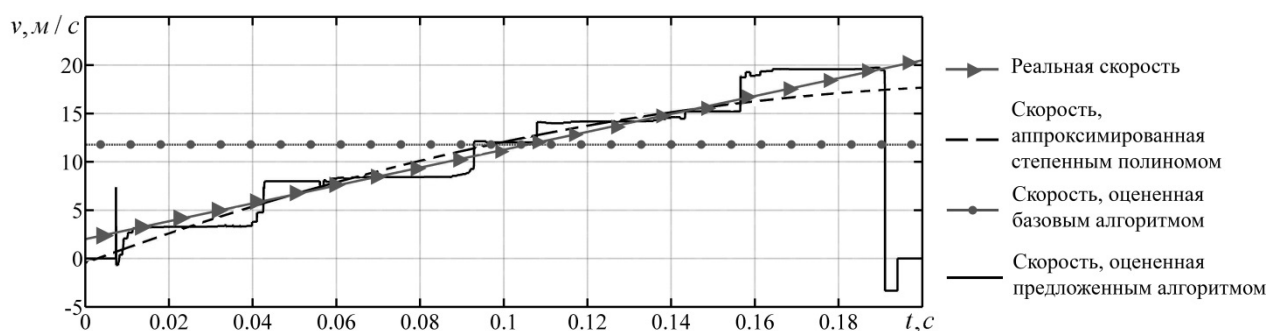


Рисунок 5 – Зависимости оценки скорости МР в ходе моделирования равноускоренного движения

Для оценки параметров перемещения МР на основе сопоставления пространственных картин модернизирован базовый итеративный алгоритм ближайших точек, что позволило использовать его в вычислительных системах с графическим процессором общего назначения. Модернизированы этапы алгоритма, в которых выполняются операции над множеством измерений по принципу «одна операция – множество данных». Благодаря оптимизации длительность сопоставления частных пространственных картин с ЛСДВР Velodyne HDL-32E составила менее 100 мс, что позволило его использовать в режиме реального времени при частоте формирования пространственных картин 10 Гц.

В результате проведённых исследований сделаны следующие выводы:

- предложенный комплексный алгоритм сопоставления позволяет оценивать пространственное положение с ошибкой не более 0,02 м на 1 м перемещения в условиях городской местности, что в 8 – 10 раз точнее показателей базового алгоритма;

- оценка скорости МР, осуществлённая предложенным алгоритмом на основе измерений с ЛСДВР, позволяет снизить геометрические искажения формируемых пространственных картин при движении МР до 3 раз эффективнее, чем при использовании базового алгоритма.

В третьей главе рассмотрены вопросы разработки и экспериментального исследования процедуры оценки точности БИИС МР.

Предложен алгоритм оценки точности, основанный на получении опорной информации о параметрах перемещения независимо от измерительных преобразователей, входящих в состав БИИС. Для этой цели используется устройство установки контрольных точек (КТ) на поверхности перемещения.

Алгоритм получения опорных данных о перемещении МР

Шаг 1. Размещение устройства для установки КТ таким образом, чтобы его пространственное положение относительно МР оставалось неизменным при его движении.

Шаг 2. Установка КТ в стартовом положении МР и фиксация параметров положения по данным БИИС.

Шаг 3. Перемещение МР по ОФ с установкой КТ. Расстояние между точками остановки определяется в ходе испытаний, в условиях помещения должно быть 1-2 м, в условиях вне помещения 4-7 м.

Шаг 4. При установке КТ фиксируется пространственное положение МР по данным БИИС.

Шаг 5. Выполнение шагов 3-4 до достижения заданной дистанции перемещения. Дистанция определяется на основе типа МР в ходе испытаний.

Шаг 6. Вычисление относительного положения установленных КТ с использованием независимой информационно-измерительной системы.

Конец алгоритма.

Особенности предложенного алгоритма:

1. Характер КТ определяется системой, используемой для проведения измерений расстояния.
2. Устройство для установки КТ должно соответствовать в габаритах и весе МР и не должно препятствовать его нормальному перемещению.
3. Алгоритм не должен использовать информацию с БИИС МР.
4. Относительное положение устройства установки КТ на МР должно быть неизменным от точки к точке.

В качестве шаблона КТ предложен треугольник, поскольку трёхвершинная конфигурация является минимально необходимой для определения взаимного положения КТ, а также показан алгоритм расчёта координат его вершин и геометрического центра на основе расстояний между вершинами. Количественным показателем оценки БИИС предложено использовать статистические параметры ошибки оценки местоположения МР.

Экспериментальные исследования предложенного алгоритма оценки точности БИИС МР проводились с использованием смоделированных данных в симуляторе V-REP, а также в реальных условиях с использованием МР Kuka YouBot. В смоделированном испытании МР переместился по маршруту с 38 путевыми точками, в ходе которого проводилось измерение расстояния перемещения средствами БИИС. Оценка пространственного положения контрольных точек позволила вычислить реальное и оцененное СКО позиционирования МР для двух моделей ошибки (таблица 3).

Таблица 3 – СКО оценки положения МР на основе данных БИИС с различными видами ошибки, вычисленное относительно идеального положения (реальное) и с использованием предложенного метода (оцененное)

Модель ошибки	Случайная, м	Случайная с накоплением, м
Оцененное	0,0421	0,116
Реальное	0,0435	0,143

Аналогичное исследование предложенного алгоритма испытания БИИС проведено в реальных условиях с использованием МР Kuka YouBot. Результаты исследования представлены в таблице 4.

Таблица 4 – СКО оценки положения МР на основе данных БИИС в локальной системе координат контрольной точки

Параметр	СКО по ОХ, м	СКО по ОУ, м	СКО суммарное, м
Значение	0,31	0,14	0,34

В результате проведённого исследования сделан вывод о том, что предложенный алгоритм испытания БИИС МР предоставляет информацию о параметрах ошибки позиционирования МР, отличающихся от смоделированных не бо-

лее чем на 25 %, что до 2-х раз эффективнее систем оценки на основе видеопозиционирования.

В четвёртой главе рассматриваются вопросы разработки и реализации модуля картографирования для МР. Независимость от системы управления МР является ключевым аспектом при разработке модуля и повышает возможности его использования на различных типах платформ. Структурная схема модуля показана на рисунке 6.



Рисунок 6 – Структурная схема модуля картографирования

Модуль картографирования состоит из подвижной и стационарной платформ, на которых могут размещаться стереосистема видеодатчиков, ЛСДВР, времяпролётный видеодатчик, а также датчики глобальной навигационной спутниковой системы, инерциальной навигационной системы и магнитного компаса. Комбинирование данных позволяет осуществлять взаимную коррекцию оценок местоположения и расширять условия использования разрабатываемого модуля в составе МР.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Разработан алгоритм калибровки измерительной системы с ЛСДВР в составе БИИС МР, позволяющий дать оценку пространственному положению датчика с суммарным СКО не более 0,003 м по линейной трансформации и не более 0,002 рад по угловой при СКО ЛСДВР не более 0,01 м.
2. Проведены экспериментальные исследования по формированию пространственной картины на основе информации от измерительной системы с ЛСДВР после проведённой калибровки предложенным алгоритмом, по результатам которых отмечено устранение геометрических искажений.

3. Модернизирован базовый алгоритм с использованием параллельных вычислений для определения относительного местоположения пространственных картин с ЛСДВР в условиях городской и полугородской местности, который позволил осуществлять сопоставление в режиме реального времени.
4. Предложенный комплексный алгоритм сопоставления позволяет оценивать пространственное положение с ошибкой не более 0,02 м на 1 м перемещения в условиях городской местности, что в 8 – 10 раз точнее показателей базового алгоритма.
5. Разработан алгоритм оценки точности БИИС МР, который позволил определить статистические параметры ошибки позиционирования МР, отличающиеся не более чем на 25 % от реальных, и предоставить опорные данные для анализа БИИС.
6. Разработан опытный образец модуля картографирования, отличающийся наличием стационарной и поворотной платформ для размещения датчиков, что позволяет оценивать параметры окружающих объектов и перемещения МР в различных типах ОФ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Борисов А.Г., Голь С.А., Жулев В.И., Лукша С.С. Метод калибровки информационно-измерительной системы на базе лазерного сканирующего дальномера // Естественные и технические науки. №5(107). С. 137-141. 2017.
2. Лукша С.С. Метод комплексного сопоставления измерительной информации с лазерного сканирующего дальномера при перемещении мобильного робототехнического комплекса // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. №5. С. 31-35. 2017.
3. Борисов А.Г., Голь С.А., Жулев В.И., Лукша С.С. Тестирование систем оценки перемещения бортовой информационно-измерительной системы мобильной робототехнической платформы методом маркерного треугольника // Естественные и технические науки. №5 (107). С.142-147. 2017.
4. Лукша С.С. Робототехнические комплексы и универсальные модули автопилотирования для решения современных бытовых и промышленных задач // Инновации. № 12 (206). С. 130-132. 2015.
5. Лукша С.С. Алгоритм построения карты окружающего пространства мобильной робототехнической платформы в реальном времени // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. № 52. С. 112-118. 2015.
6. Борисов А.Г., Лукша С.С. Алгоритмы обработки динамически формируемых карт помещений при поиске объекта с заданными характеристиками // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. №54(2). С. 104-109. 2015.
7. Лукша С.С., Погудаев А.А. Алгоритмы анализа карт помещений в задаче поиска объекта с заданными характеристиками автономной мобильной робото-

технической платформой // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. № 51. С. 2-8. 2014.

8. Артёмкин В.В., Лукша С.С., Маликов А.Ю. Реализация сценария «следуй за мной» беспилотной системы управления автомобилем-роботом на основе данных лидара и видеодатчика // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. № 4-3 (46). С. 28-34. 2013.
- Публикации в международных изданиях*
9. Stanislav A. Goll, Sergey Luksha, Vladimir S. Leushkin, Alexandr G. Borisov. Testing of the system for estimation of mobile robotic platform displacements by the method of a marker triangle. 2016 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2016 - Including ECyPS 2016, BIOENG.MED 2016, MECO: Student Challenge 2016 5. 2016. С. 188-191.
10. Stanislav A. Goll, Sergey Luksha, Vladimir S. Leushkin, Alexandr G. Borisov. Unmanned ground vehicle local trajectory planning algorithm. 2016 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2016 - Including ECyPS 2016, BIOENG.MED 2016, MECO: Student Challenge 2016 5. 2016. С. 317-321.
11. Stanislav A. Goll, Sergey Luksha, Vladimir S. Leushkin, Alexandr G. Borisov. Construction of the local patency map on the data from Velodyne LiDAR. 2016 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2016 - Including ECyPS 2016, BIOENG.MED 2016, MECO: Student Challenge 2016 5. 2016. С. 184-187.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619451. Программа сбора и обработки данных с модуля локального картографирования и навигации / Лукша С.С., Леушкин В.С., Кузнецов А.А. 2017.

Соискатель

С.С. Лукша

Лукша Сергей Сергеевич

АЛГОРИТМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КАРТИНЫ
ОБЛАСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА
ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Заказ № 8058. Тираж 120 экз. Подписано в печать 18.12.2017
Бумага офсетная. Печать ризографическая.

Отпечатано в ООО «НПЦ «Информационные технологии»
Лицензия серия ПЛД № 66-16 от 20 июля 1999 г.
г. Рязань, ул. Островского, 21/1. Тел. (4912) 98-69-84