

На правах рукописи



ФАН ЧАН ДАНГ ХОА

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ
ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ ОПТИКО-
ЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.11.16 - Информационно-измерительные и управляющие
системы (в промышленности)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Тульский государственный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук,
Овчинников Александр Викторович

Официальные оппоненты: Ким Николай Владимирович,
кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский авиационный
институт (национальный
исследовательский университет)»,
профессор кафедры 704 «Информационно-
управляющие комплексы»

Егошина Ирина Лазаревна,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Поволжский
государственный технологический
университет», профессор кафедры
радиотехнических и медико-биологических
систем

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
университет «МИЭТ»

Защита состоится «20» мая 2015 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.271.07 при ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92 (9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» и на сайте <http://tsu.tula.ru/>

Автореферат разослан «31» марта 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Данилкин
Фёдор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время непрерывно растёт интерес к автономным мобильным (подвижным) объектам, функционирующим в повседневном окружении человека - в промышленной или бытовой среде. Примерами подобных объектов являются производственный транспорт, автономные пылесосы и т.п., действующие в недетерминированных искусственных средах. Все перечисленные объекты в своем составе содержат информационно-измерительные системы (ИИС) для определения параметров движения (координат и ориентации) подвижных объектов.

Традиционно на наземных подвижных объектах в качестве основного источника информации о таких параметрах движения, как координаты и ориентация, используются одометрические и инерциальные системы счисления пути. Однако невысокая точность и присутствие накапливаемых во времени ошибок у подобных систем ограничивают области их применения и в большинстве случаев требуют комплексирования данных от этих систем с данными дополнительных систем. В качестве дополнительных систем могут выступать спутниковые навигационные системы (СНС), радионавигационные системы (РНС), телевизионные информационно-измерительные системы (системы технического зрения) и т.д.

В ряде приложений применение СНС и РНС затруднено, что связано с особенностями распространения сигналов данных систем. В этом случае телевизионные информационно-измерительные системы (ТИИС) оказываются наиболее эффективными для измерения параметров движения объектов при эксплуатации в недетерминированных искусственных средах (например, в помещениях), где недоступны сигналы СНС и РНС.

При использовании ТИИС для решения задачи определения параметров движения требуется расширение поля сканирования до полусферы, что позволит повысить эффективность работы системы, особенно в экстремальных условиях. Расширение поля возможно несколькими методами – использованием нескольких преобразователей с последующим «сшиванием» данных, либо использованием специализированных широкоугольных преобразователей. Второй вариант является наиболее предпочтительным, т.к. позволяет строить более компактные системы.

Полусферический оптико-электронный преобразователь (ПСОЭП), состоящий из фотоэлектронного преобразователя и полусферического зеркального отражателя, является одним из перспективных для использования в ТИИС, т.к. обеспечивает круговой обзор окружающего пространства в реальном масштабе времени. Однако практическое использование ПСОЭП затруднено, т.к. в настоящий момент теория и алгоритмы обработки данных этого типа преобразователя не развиты.

Перечисленные обстоятельства показывают актуальность решаемой в диссертации задачи разработки информационно-измерительной системы для определения параметров движения подвижных объектов на базе полусферического оптико-электронного преобразователя и одометрической системы в искусственных средах.

Целью работы является повышение точности информационно-измерительных систем для определения координат и ориентации подвижных объектов в искусственных средах за счёт комплексирования информации от одометрической системы и полусферического оптико-электронного преобразователя.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать структуру ИИС для определения параметров движения подвижного объекта на базе одометрической системы и ПСОЭП.
2. Разработать математическую модель ПСОЭП.
3. Разработать алгоритм геометрической калибровки ПСОЭП.
4. Разработать алгоритмы выделения и идентификации характерных элементов на изображениях, формируемых ПСОЭП.
5. Разработать алгоритм комплексирования информации от ПСОЭП и одометрической системы.

Объектом исследования является ИИС для определения параметров движения подвижного объекта в искусственных средах на базе ПСОЭП и одометрической системы.

Предметом исследования являются математическая модель ПСОЭП, методы и алгоритмы обработки информации ИИС для определения параметров движения подвижного объекта на базе ПСОЭП и одометрической системы, позволяющие повысить точность измерения координат и ориентации подвижного объекта.

Методы исследований. В работе использованы методы цифровой обработки изображений, методы оптимизации, методы оптимальной фильтрации, численные методы, методы компьютерного моделирования, экспериментальные исследования.

Достоверность и обоснованность результатов работы, а также адекватность предложенных моделей, подтверждается корректностью использованных методов исследования, систематичностью анализа и синтеза моделей, методов и алгоритмов, сходимостью теоретических выводов и данных экспериментов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана структура информационно-измерительных систем для определения параметров движения подвижных объектов на основе одометрической системы и ПСОЭП, позволяющая повысить точность измерения координат и ориентации подвижного объекта.
2. Разработана математическая модель ПСОЭП, учитывающая геометрические параметры и оптические искажения составных элементов преобразователя.
3. Разработан алгоритм геометрической калибровки ПСОЭП, учитывающий особенности конструкции ПСОЭП и позволяющий повысить точность измерений.
4. Разработаны алгоритмы выделения и идентификации характерных объектов сцены на последовательности полусферических изображений,

обеспечивающие высокую точность за счет непосредственной обработки полусферических изображений без дополнительных промежуточных преобразований.

5. Разработан алгоритм обработки и комплексирования информации о параметрах движения и угловом положении от одометрической системы и ПСОЭП, отличающийся от известных возможностью использования естественных ориентиров и позволяющий повысить точность измерений координат и ориентации подвижного объекта.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель ПСОЭП, позволяющая проводить его имитационное моделирование.

2. Разработан алгоритм геометрической калибровки ПСОЭП, позволяющий выполнить коррекцию ошибок юстировки алгоритмическим способом.

3. Разработан способ оценки влияния различных факторов на погрешность измерения координат статичных объектов ИИС для определения параметров подвижных объектов на базе ПСОЭП.

4. Разработана структура ИИС для определения параметров подвижных объектов в искусственных средах на базе ПСОЭП и одометрической системы и алгоритм комплексирования данных, позволяющие снизить накапливаемую погрешность одометрической системы.

Реализация и внедрение полученных результатов. Разработанные в диссертации методы и алгоритмы были использованы в качестве теоретической основы при создании ИИС различного назначения. В частности, разработаны и исследованы системы на основе ПСОЭП для кругового обзора, а также определения параметров движения подвижных объектов в искусственных средах. Разработанные в ходе исследований измерительные системы внедрены в учебный процесс кафедры радиоэлектроники ТулГУ.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: V-й научно-практической конференции «Молодёжные инновации» (Тула, 2011); IX Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы наземной радиолокации» (Тула, 2012); X Международной научно-практической конференции «Распознавание-2012» (Курск, 2012); Всероссийской научно-технической конференции «XXI век глазами молодёжи» (Тула, 2013); 23-rd International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon) (Владивосток, 2013).

Публикации. Основное содержание работы отражено в 17 публикациях, в том числе 2 статьи в журнале, рекомендованном ВАК, 1 статья входит в список Web of Science и SCOPUS, 10 тезисов докладов на Всероссийских и Международных научно-практических конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, 5 глав основной части, заключение, изложенные на 173 страницах машинописного текста, список использованных источников, состоящий из 121 наименования, приложения. Материал работы включает 63 рисунка, 4 таблицы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель ПСОЭП, отличающаяся от существующих учетом геометрических параметров и оптических характеристик ПСОЭП.
2. Алгоритм геометрической калибровки ПСОЭП, позволяющий оценить параметры математической модели ПСОЭП и выполнить коррекцию ошибок юстировки алгоритмическим способом.
3. Алгоритмы выделения и идентификации характерных элементов сцены на последовательности полусферических изображений, отличающиеся от существующих алгоритмов непосредственной обработкой полусферических изображений без дополнительных промежуточных преобразований в другие формы.
4. Структура ИИС для определения параметров движения подвижных объектов в искусственных средах на базе ПСОЭП и одометрической системы, а также алгоритмы обработки информации в них, позволяющие повысить точность измерений координат и ориентации подвижного объекта.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследования, представлены тезисы научной новизны и положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнено исследование ИИС для определения параметров подвижных объектов и преобразователей для получения информации о текущем положении объекта, рассмотрены основные варианты реализации оптико-электронных преобразователей ИИС, разработаны принципы построения ИИС для определения параметров движения подвижного объекта на основе ПСОЭП и одометрической системы.

Исследования показали, что наиболее перспективными для решения задач определения параметров подвижных объектов являются ИИС на базе ТИИС, в которых в качестве основного источника информации используются одометрические и инерциальные системы. Среди ТИИС особого внимания заслуживают системы на основе катадиоптрических оптико-электронных преобразователей (КДОЭП), состоящих из зеркального отражателя второго порядка и светочувствительной матрицы.

По признаку эффективного центра проекции КДОЭП делятся на две группы: центральнопроективные и нецентральнопроективные.

Анализ различных видов КДОЭП показал, что нецентральнопроективные КДОЭП, к числу которых относится ПСОЭП, обладают рядом преимуществ по сравнению с центральнопроективными.

С учётом этого, разработана структура и предложена функциональная схема (рис.1) ИИС для определения параметров подвижных объектов в недетерминированных искусственных средах на базе ПСОЭП и одометрической системы.



Рис. 1. Функциональная схема ИИС для определения параметров подвижного объекта в недетерминированных искусственных средах на базе ПСОЭП и одометрической системы

ПСОЭП выполняет функцию выделения и идентификации характерных элементов окружающего пространства, а также измерения их азимутальных углов. В качестве характерных элементов среды используются естественные прямые вертикальные и горизонтальные линии среды (например, проемы дверей, окон, углы и т.д.). Совместная обработка измерений азимутальных углов от ПСОЭП и данных о скорости и повороте от одометрической системы на основе расширенного фильтра Калмана позволила повысить точность измерения координат и ориентации подвижного объекта.

Во второй главе произведен анализ известных математических моделей ПСОЭП, показаны ограничения на их использование, разработана математическая модель ПСОЭП и алгоритм геометрической калибровки ПСОЭП.

В диссертации показано, что математическая модель ПСОЭП описывает, с помощью ряда промежуточных преобразований, связь между входными данными ${}^w\mathbf{P} = [x_{pw} \ y_{pw} \ z_{pw}]^T$, являющимися точками трехмерного пространства в системе координат сцены \mathbf{W} , и выходными данными ${}^I\mathbf{p} = [u \ v]^T$, являющимися точками изображения на светочувствительной матрице ПСОЭП в пиксельной системе координат \mathbf{I} , привязанной к светочувствительной матрице (рис. 2).

Для переноса точки ${}^w\mathbf{P}$ в систему координат \mathbf{S} , привязанной к полусферическому зеркальному отражателю, была использована матрица вращения ${}^S\mathbf{R}$ и вектор трансляции ${}^S\mathbf{t}_w$:

$$\begin{bmatrix} {}^S\mathbf{P} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^S\mathbf{R} & {}^S\mathbf{t}_w \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^w\mathbf{P} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

а симметричность полусферического отражателя позволила рассмотреть процесс формирования изображения на плоскости сечения π , содержащей источник оптической волны ${}^S\mathbf{P}$ и оптическую ось зеркала.

Показано, что трехмерная точка ${}^S\mathbf{P}$ соответствует двумерной точке ${}^\pi\mathbf{P} = [x_{p\pi} \ y_{p\pi}]^T$ в плоскости π , где $x_{p\pi} = \sqrt{x_{ps}^2 + y_{ps}^2 + z_{ps}^2} \sin\theta_p$, θ_p -

зенитный угол точки ${}^S P$, $y_{p\pi} = z_{ps}$, а трехмерная точка ${}^S m$ соответствует двумерной ${}^\pi m = [x_{m\pi} \ y_{m\pi}]^T$. Оптический центр фотоэлектронного преобразователя соответствует точке ${}^\pi C_0 = [0 \ d]^T$, где d - расстояние от центра зеркала S_0 до оптического центра фотоэлектронного преобразователя.

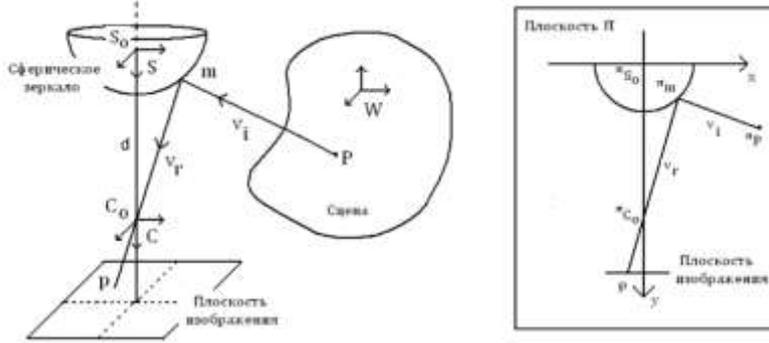


Рис.2. Схематическая иллюстрация ПСОЭП с указанием систем координат

Обозначив в плоскости π падающую оптическую волну из точки ${}^\pi P$ в точку отражения ${}^\pi m$ как $v_i = {}^\pi m - {}^\pi P$, отраженную оптическую волну из точки отражения ${}^\pi m$ в оптический центр ${}^\pi C_0$ как $v_r = {}^\pi C_0 - {}^\pi m$ и нормаль к поверхности отражателя в точке отражения как $n = [x_{m\pi} \ y_{m\pi}]^T$ получено выражение, связывающее нормаль, падающую и отраженную волны в векторном виде:

$$v_i = v_r - \frac{2n(n^T v_r)}{(n^T n)}. \quad (2)$$

С другой стороны вектор падающей оптической волны определен через две точки ${}^\pi P$ и ${}^\pi m$:

$$v_i \times ({}^\pi P - {}^\pi m) = 0, \quad (3)$$

что позволило составить окончательное уравнение для вычисления координат точки отражения ${}^\pi m$:

$$A y_{m\pi}^4 + B y_{m\pi}^3 + C y_{m\pi}^2 + D y_{m\pi} + E = 0, \quad (4)$$

где: $A = 4d^2(x_{p\pi}^2 + y_{p\pi}^2)$; $B = -4dR^2[x_{p\pi}^2 + y_{p\pi}(d + y_{p\pi})]$; $C = x_{p\pi}^2(R^4 - 4d^2R^2) + R^4(d + y_{p\pi})^2 - 4d^2R^2y_{p\pi}^2$; $D = 2dR^4[x_{p\pi}^2 + 2y_{p\pi}(d + y_{p\pi})]$; $E = d^2R^4x_{p\pi}^2 - R^6(d + y_{p\pi})^2$; R - радиус полусферического отражателя.

Перенос точки отражения ${}^\pi m$ из системы координат зеркала S в систему координат фотоэлектронного преобразователя C выполнен на основе выражения: ${}^c m = {}^s m + {}^c t_s$, где ${}^c t_s = [0 \ 0 \ -d]^T$ - вектор трансляции.

Нахождение перспективной проекции точки отражения на нормированную плоскость изображения выполнено на основе уравнения:

$${}^c \hat{p} = \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{mc} \\ z_{mc} \\ y_{mc} \\ z_{mc} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

В реальных условиях оптическая система фотоэлектронного преобразователя неидеальна и характеризуется разновидностью аберраций

(дисторсий), которые приводят к смещению координат реальных точек изображения от идеальных. В работе показано, что координаты точки ${}^c\hat{\mathbf{p}}$ с учетом воздействия радиальной и тангенциальной дисторсии определяются выражением:

$${}^c\hat{\mathbf{p}}_d = \begin{bmatrix} \hat{u}_d \\ \hat{v}_d \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6) {}^c\hat{\mathbf{p}} + \mathbf{dx}; \quad (6)$$

где $r^2 = \hat{u}^2 + \hat{v}^2$; и k_i ($i = 1 \dots 5$) – коэффициенты дисторсии; \mathbf{dx} – вектор тангенциальной дисторсии.

Окончательным этапом преобразования явилось нахождение проекции точки ${}^c\hat{\mathbf{p}}_d$ на действительную светочувствительную матрицу. При преобразовании учитывались такие внутренние параметры фотоэлектронного преобразователя, как фокусное расстояние f , масштабный параметр пикселя k и l , координаты центра изображения $[u_0 \ v_0]^T$, угол наклона θ между осями изображения:

$$\begin{bmatrix} {}^l\mathbf{p} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kf & -kfc\tg\theta & u_0 \\ 0 & lf/\sin\theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c\hat{\mathbf{p}}_d \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Совокупность полученных уравнений (1)-(7) является математической моделью ПСОЭП. В отличие от существующих моделей разработанная модель учитывает геометрические параметры конструкции ПСОЭП и воздействие дисторсии оптической системы фотоэлектронного преобразователя.

Для коррекции ошибок в определении координат изображения объектов и восстановления направления на объект, возникающих вследствие неидеальной юстировки системы, разработан алгоритм геометрической калибровки ПСОЭП. Под калибровкой ПСОЭП подразумевается определение параметров разработанной математической модели. Разработанный алгоритм геометрической калибровки позволил оценить параметры математической модели ПСОЭП и выполнить алгоритмическим способом коррекцию ошибок, возникших из-за неточной первоначальной юстировки ПСОЭП.

В третьей главе приведены результаты разработки алгоритмов выделения и идентификации характерных элементов на последовательности полусферических изображений, в качестве которых используются вертикальные и горизонтальные линии.

Выделение вертикальных линий. Анализ полусферических изображений показал, что вертикальные линии среды на плоскости изображения ПСОЭП отображаются в виде радиальных линий, что позволило трансформировать задачу выделения вертикальных линий среды в задачу выделения радиальных линий на полусферических изображениях. Разработанный алгоритм выделения вертикальных линий включает в себя: определение центра полусферического изображения, выделение точек интереса и выделение радиальных линий на изображении.

Определение центра полусферического изображения основано на подборе окружности по точкам, принадлежащим внешней границе изображения, а выделение точек интереса - на оценке градиентов точек изображения. Для выделения радиальных линий из набора точек интереса предложено

модифицированное преобразование Хафа.

Выделение горизонтальных линий. В диссертации показано, что образ горизонтальных линий на полусферических изображениях представляет собой кривую, форма которой не может быть аналитически определена. Проведенный анализ позволил принять решение об аппроксимации формы изображений горизонтальных линий окружностью, что трансформировало задачу выделения горизонтальных линий в задачу подбора окружностей проходящих через краевые точки на полусферических изображениях. Для снижения влияния шума предложено подбор окружностей осуществлять для заранее выделенных связанных точек интереса.

Идентификация вертикальных линий. Для идентификации вертикальных линий предложено использовать метод сравнения окрестностей на основе дескрипторов – числовой формы описания признаков объекта, а в качестве признаков при заполнении дескриптора использовать гистограмму направлений градиента. Для более детального описания вертикальной линии предложено разбивать область интереса вблизи линии на две части по ширине, а каждую часть области интереса дополнительно разбивать на секторы, которые описываются своими дескрипторами. Совокупность дескрипторов всех секторов составляет дескриптор каждой части области интереса, а дескрипторы частей области интереса образуют дескриптор вертикальной линии.

В качестве меры для сравнения двух дескрипторов использовано евклидово расстояние. Для увеличения точности сопоставления вертикальных линий предложен следующий критерий сравнения: первый кандидат, соответствующий наименьшему расстоянию, считается верным соответствием только тогда, когда он отстоит от следующего кандидата на достаточно уверенное (большое) расстояние.

Идентификация горизонтальных линий. Исследования показали, что идентификация горизонтальных линий по сравнению с вертикальными линиями сложнее за счет кривизны их форм образов, изменяющихся в зависимости от расположения относительно ПСОЭП. Поэтому кроме требований, которые были определены для дескриптора вертикальных линий, введено дополнительное требование - дескриптор горизонтальной линии должен быть инвариантен к изменению формы образа.

В качестве области интереса горизонтальной линии предложено выбирать пиксели, расположенные вблизи линии, а затем преобразовывать область интереса в прямоугольный вид. Таким образом, образ горизонтальной линии, имеющий вид кривой, преобразуется в прямую линию, а её окрестность, имеющая искривленную форму – в прямоугольную. Дальнейшие процедуры сопоставления дескрипторов горизонтальных линий и их сопоставления аналогичны соответствующим процедурам для вертикальных линий.

Главным преимуществом разработанных алгоритмов выделения и идентификации вертикальных и горизонтальных линий на последовательности полусферических изображений является непосредственная обработка исходных полусферических изображений без дополнительных промежуточных преобразований в другие форматы изображений и использование операций,

позволяющих повысить устойчивость алгоритмов к воздействию шумов и других дестабилизирующих факторов.

В четвертой главе приведены результаты разработки ИИС для определения параметров движения (координат и ориентации) подвижного объекта в искусственных средах на базе ПСОЭП и одометрической системы.

В диссертации отмечено, что ПСОЭП в составе ИИС для определения параметров подвижного объекта в искусственных средах выполняет функцию выделения, отслеживания и измерения координат вертикальных линий по последовательности их изображений. Это позволяет комплексировать угловые измерения от ПСОЭП и измерения одометрической системы на основе расширенного фильтра Калмана (РФК).

Т.к. в качестве ориентиров предложено использовать вертикальные линии, информация о местоположении которых заранее неизвестна, то в процессе обработки важной является процедура инициализация их координат и ковариационных матриц (КМ), влияющая на точность совместной обработки информации с помощью РФК.

В диссертации показано, что для подвижного объекта, движущегося по плоской поверхности, координаты вертикальной линии определяются методом триангуляции:

$$\mathbf{x}_L = \mathbf{g}(\mathbf{x}_{R_i}, \mathbf{x}_{R_j}, \theta_i, \theta_j) = \begin{bmatrix} \frac{x_{r_i}s_i c_i - x_{r_j}s_j c_i + (y_{r_j} - y_{r_i})c_i c_j}{s_i c_j - s_j c_i} \\ \frac{y_{r_j}s_i c_i - y_{r_i}s_j c_i + (x_{r_i} - x_{r_j})s_i s_j}{s_i c_j - s_j c_i} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\mathbf{x}_{R_i} = [x_{r_i} \ y_{r_i} \ \phi_{r_i}]^T$, $\mathbf{x}_{R_j} = [x_{r_j} \ y_{r_j} \ \phi_{r_j}]^T$ - состояния подвижного объекта в двух позициях; θ_i и θ_j - измерения азимутальных углов вертикальной линии в двух позициях подвижного объекта; $s_{i(j)} = \sin(\phi_{r_{i(j)}} + \theta_{i(j)})$, $c_{i(j)} = \cos(\phi_{r_{i(j)}} + \theta_{i(j)})$.

Установлено, что шумы измерений ИИС влияют на точность определения координат вертикальных линий. Проведенный анализ воздействия различных факторов на точность измерения координат вертикальных линий показал, что при увеличении перемещения между двумя соседними измерениями неопределенность оценки снижается и форма плотности распределения вероятностей (ПРВ) изменяется от асимметричной к гауссовской. Это позволило сделать вывод, что измерение координат вертикальной линии считается точным, если её ПРВ приближается к гауссовской форме и предложить алгоритм инициализации вертикальных линий на основе оценки статистических характеристик ПРВ измерений координат вертикальных линий.

В качестве входных данных для алгоритма инициализации предложено использовать вектор входных величин (измерений), состоящий из измерений одометрической системы и ПСОЭП:

$$\boldsymbol{\mu} = [\mathbf{x}_{R_i}^T \ \mathbf{x}_{R_j}^T \ \theta_i \ \theta_j] \quad (9)$$

и КМ \mathbf{P} вектора измерений $\boldsymbol{\mu}$, являющаяся диагональной матрицей, ненулевые

элементы которой соответствуют дисперсии шумов измерений.

$$\mathbf{P} = \text{diag} \left\{ \sigma_{x_{r_i}}^2, \sigma_{y_{r_i}}^2, \sigma_{\phi_{r_i}}^2, \sigma_{x_{r_j}}^2, \sigma_{y_{r_j}}^2, \sigma_{\phi_{r_j}}^2, \sigma_{\theta_i}^2, \sigma_{\theta_j}^2 \right\}. \quad (10)$$

В диссертации показано, что совокупность взвешенных выборок Γ в пространстве измерений с достаточной точностью описывает статистические характеристики ПРВ входных случайных величин уравнения (8). Т.к. распределение этих величин является нормальным с математическим ожиданием (МО) вектора измерений $\boldsymbol{\mu}$ и ковариационной матрицей \mathbf{P} , то статистические характеристики совокупности взвешенных выборок Γ удовлетворяют следующим условиям:

$$\sum_1^p w_i = 1; \quad \mathbf{M}[\Gamma] = \sum_1^p w_i \Gamma_i = \boldsymbol{\mu}; \quad \boldsymbol{\Sigma} = \sum_1^p w_i (\Gamma_i - \mathbf{M}[\Gamma])^2 = \mathbf{P}, \quad (11)$$

где w_i - взвешенный коэффициент выборки Γ_i .

Вычисление координат \mathbf{x}_{L_i} вертикальной линии по (8) для каждого набора выборок Γ_i позволяет сформировать совокупность Ψ выборок измерений координат вертикальной линии, на основе которой возможно определять МО, КМ и коэффициенты асимметрии по осям ПРВ, необходимые для оценки точности инициализации вертикальной линии.

Комплексирование измерений от ПСОЭП и одомерической системы в разработанной ИИС предлагается осуществлять на основе РФК. Для учёта того, что вертикальные линии находятся в поле зрения ПСОЭП ограниченный интервал времени и по ходу движения подвижного объекта появляются новые вертикальные линии, в состав алгоритма комплексирования измерений, кроме двух основных этапов (экстраполяции и коррекции) РФК, дополнительно введен этап прибавления новых инициализированных вертикальных линий.

К особенностям разработанного алгоритма комплексирования относятся:

- Использование вектора состояния системы, включающего в шаге k не только текущие состояния $\mathbf{x}_R^T[k]$ подвижного объекта, но и координаты $\mathbf{x}_{L_i}^T[k]$ инициализированных вертикальных линий:

$$\mathbf{x}[k] = [\mathbf{x}_R^T[k] \quad \mathbf{x}_{L_1}^T[k] \dots \mathbf{x}_{L_n}^T[k]]^T. \quad (12)$$

- Условие статичности инициализированных вертикальных линий при экстраполяции, обеспечивающей предсказание вектора состояния системы с шага $(k-1)$ на шаг k с помощью динамической модели системы, описывающей изменение состояния подвижного объекта.

- Использование на этапе коррекции измерений азимутальных углов инициализированных вертикальных линий повторно наблюдающихся в момент времени k для коррекции ошибки экстраполированного вектора состояния системы. Если в момент времени k имеются новые инициализированные вертикальные линии, то их МО и КМ прибавляются к схеме работы РКФ на этапе прибавления новых инициализированных вертикальных линий.

- Использование в качестве модели наблюдения измерений азимутальных углов инициализированных вертикальных линий от ПСОЭП.

Разработанный алгоритм комплексирования обеспечивает коррекцию возрастающей ошибки одомерической системы и повышение точности определения параметров движения подвижного объекта, как за счет точной

инициализации вертикальных линий, так и за счет модификации РФК.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов.

1. Экспериментальное исследование алгоритма калибровки ПСОЭП. Результаты экспериментальных исследований показали, что средняя ошибка калибровки по предложенному алгоритму по осям Ox , Oy составляет 0.192 и 0.184 пикселя, соответственно, а СКО - 0.197 и 0.142.

2. Экспериментальное исследование алгоритмов выделения вертикальных и горизонтальных линий. Для оценки эффективности алгоритмов выделения вертикальных и горизонтальных линий использовался показатель повторяемости, который определяет долю выделенных объектов в первой попытке алгоритма, повторно выделяемых во второй попытке. Исследования показали, что выигрыш по повторяемости предложенных алгоритмов при воздействии различных внешних факторов достигает 20% по сравнению с известными алгоритмами.

3. Экспериментальное исследование алгоритмов идентификации линий. Зависимости вероятности верной идентификации от различных факторов показаны на рис. 6. Исследования, выполненные для различных искусственных сред, показали, что вероятность верной и ложной идентификации для предложенных алгоритмов составляет 0.92 и 0.01, соответственно.

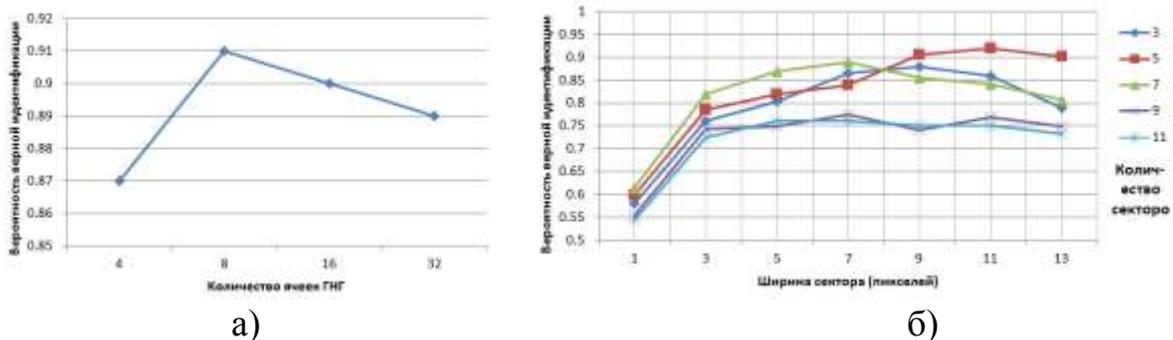


Рис. 6. Зависимость вероятности верной идентификации от: а) количества ячеек гистограммы направлений градиентов; б) ширины сектора при различных количествах секторов

4. Оценка точности алгоритма комплексирования информации в ИИС для определения параметров подвижного объекта на основе ПСОЭП и одометрической системы. На рис. 7 показаны 3 траектории, оцененные сканирующим лазерным дальномером SICK, одометрической системой и предлагаемой ИИС на основе ПСОЭП и одометрической системы. Как видно, точность измерения параметров движения подвижного объекта предложенной ИИС сопоставима с точностью системы на базе сканирующего лазерного дальномера.

Средние ошибки определения координат подвижного объекта по осям Ox и Oy с помощью одометрической системы составили 0.085м и 0.3м, соответственно; для предложенной ИИС – 0.026м и 0.031м (рис. 8). Неопределенность измерения координат подвижного объекта с помощью ИИС на основе ПСОЭП и одометрической системы имеет установившийся режим

(рис.9), который находится в диапазоне 0.015-0.033м, что говорит о возможности корректировать накапливающуюся ошибку одометрической системы.

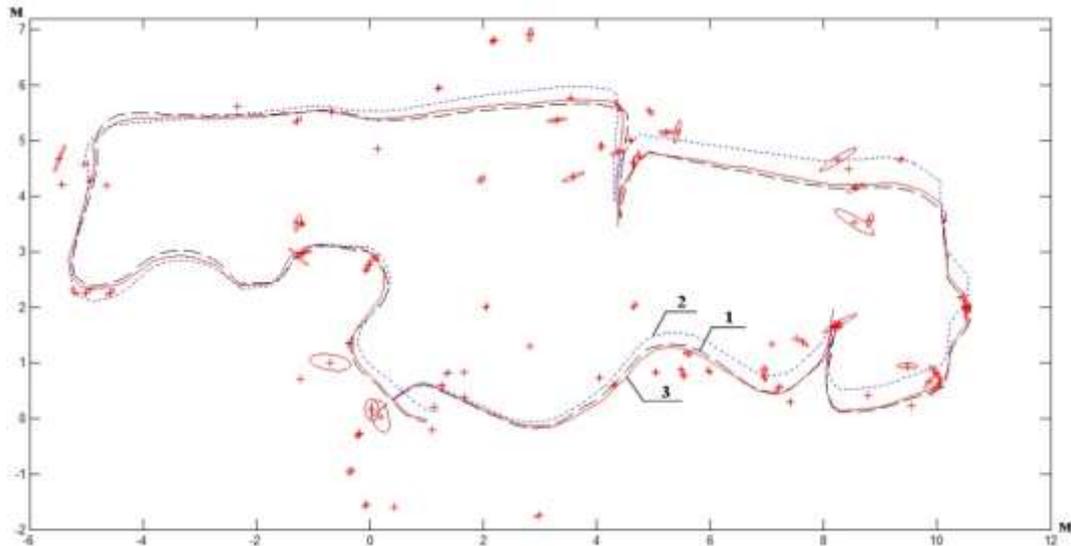


Рис. 7. Траектории, оцененные сканирующим лазерным дальномером SICK (1), одометрической системой (2) и ИИС на основе ПСОЭП и одометрической системы (3); «+» - вертикальные линии, эллипсы – неопределенность измерения координат вертикальных линий

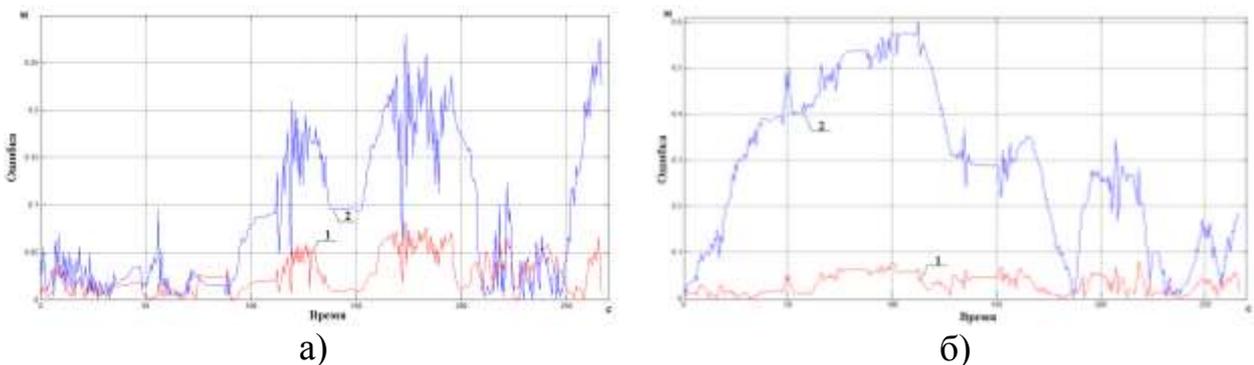


Рис. 8. Ошибки измерения координат подвижного объекта с помощью ИИС на основе ПСОЭП и одометрической системы (1) и одометрической системы (2): а) по Ox и б) по Oy

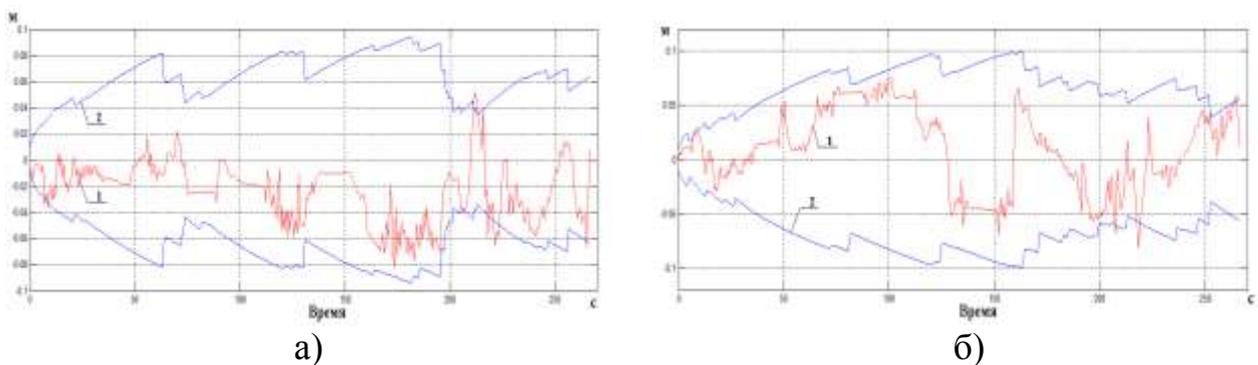


Рис. 9. Ошибки (1) и линии утроенного СКО (2) измерения координат подвижного объекта с помощью ИИС на основе ПСОЭП и одометрической системы: а) по Ox и б) по Oy

Полученные результаты показали, что предложенный алгоритм комплексирования позволил уменьшить ошибку измерений одометрической системы на 80%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана структура информационно-измерительных систем для определения параметров движения подвижных объектов на основе одометрической системы и ПСОЭП, позволяющая повысить точность измерения координат и ориентации подвижного объекта.

2. Разработана математическая модель ПСОЭП, отличающаяся от существующих тем, что учитывает геометрические параметры полусферического зеркала и оптические искажения составных элементов преобразователя.

3. Разработан алгоритм геометрической калибровки ПСОЭП, учитывающий особенности конструкции ПСОЭП и позволяющий оценить его внутренние и внешние параметры с ошибкой калибровки менее 1 пикселя.

4. Разработаны алгоритмы выделения и идентификации вертикальных и горизонтальных линий на последовательности полусферических изображений, обеспечивающие высокую точность и устойчивость к различным искажениям изображения за счет непосредственной обработки полусферических изображений. По сравнению с существующими разработанные алгоритмы показывают выигрыш до 20% по повторяемости.

5. Разработан алгоритм комплексирования измерений ПСОЭП и одометрической системы, позволяющий повысить точность измерения координат и ориентации подвижного объекта на 80% по сравнению с одометрической системой и получить точность, сопоставимую с точностью системы на базе сканирующего лазерного дальномера.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Овчинников А.В., **Фан Ч. Х.** Алгоритм выделения характерных элементов на изображениях полусферических видеокамер // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула, 2013. - № 1. – с. 233-245.

2. **Фан Ч. Х.** Геометрическая калибровка полусферической видеокамеры // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула, 2013. - № 7(2). – с. 141-151.

Статьи в других научных изданиях и материалы конференций:

3. Макарецкий Е.А., Овчинников А.В., **Фан Ч. Х.** Полусферические камеры прикладных телевизионных систем: получение и преобразование полусферических изображений // Компоненты и технологии. - 2010.- №9.- с.30-32.

4. Макарецкий Е.А., Овчинников А.В., **Фан Ч. Х.** Выделение и сопровождение движущихся объектов на полусферических изображениях // Компоненты и технологии. - 2011. - №1. - с. 31-36.

5. Овчинников А. В., **Фан Ч. Х.** Обработка полусферических изображений: определение центра изображения и выделение вертикальных линий // Компоненты и технологии. - 2011. - №12. - с. 133-136.

6. Овчинников А. В., **Фан Ч. Х.** Вычисление центра полусферического

изображения // Труды VIII Всероссийской научно – технической Интернет - конференции. Проблемы наземной радиолокации. – Тула, 2011. – с. 35-37.

7. Овчинников А. В., **Фан Ч. Х.** Выделение краевых точек на полусферических изображениях // Труды VIII Всероссийской научно – технической Интернет - конференции. Проблемы наземной радиолокации. – Тула, 2011. – с. 37-40.

8. Овчинников А. В., **Фан Ч. Х.** Модификация алгоритма преобразования Хафа для обработки полусферических изображений // Труды VIII Всероссийской научно – технической Интернет - конференции. Проблемы наземной радиолокации. – Тула, 2011. – с. 40-42.

9. Овчинников А. В., **Фан Ч. Х.** Алгоритм выделения прямых линий пространства на полусферических изображениях // Труды IX Всероссийской научно–технической Интернет-конференции. Проблемы наземной радиолокации. – Тула, 2012. – с. 40-41.

10. Овчинников А. В., **Фан Ч. Х.** Методы выделения и сопровождения вертикальных линий на полусферических изображениях телевизионных систем // Распознавание 2012: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2012. – с. 267-268.

11. Овчинников А. В., **Фан Ч. Х.** Алгоритмы обработки полусферических изображений для выделения и сопровождения движущихся объектов // Медико-экологические информационные технологии – 2012: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2012. – с. 126-128.

12. Овчинников А. В., **Фан Ч. Х.** Алгоритм выделения прямых линий пространства на полусферических изображениях // Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Тамбов, 2013. – с. 101.

13. Овчинников А. В., **Фан Ч. Х.** Локализационная система мобильного объекта на основе полусферической видеокамеры // Распознавание 2013: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2013. – с. 170-172

14. **Фан Ч. Х.** Система определения текущего положения мобильных объектов // XXI век глазами молодёжи: тез. докл. Всероссийской науч.-техн. конф. – Тула, 2013. – с. 289-291.

15. Овчинников А. В., **Фан Ч. Х.** Система локализации робота на основе полусферической камеры// The 23-rd International Conference on Computer Graphics and Vision. - Владивосток, 2013. – с. 122-126.

16. Овчинников А. В., **Фан Ч. Х.** Обработка полусферических изображений: Идентификация вертикальных линий // Компоненты и технологии. - 2013. - №14. - с. 153-156.

17. **Phan D. K., Ovchinnikov A. V.** Indoor SLAM using an Omnidirectional Camera // MEJSR. – 2013. – Vol. 16 (1). – с. 88-94.