

Абдулкадим Хуссейн Абдуламир

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
КООРДИНАТ АВТОНОМНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальности:

05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»
05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Телекоммуникации» Ульяновского государственного технического университета.

Научные руководители - доктор технических наук, профессор
Васильев Константин Константинович,
- кандидат технических наук, доцент
Дементьев Виталий Евгеньевич

Официальные оппоненты –

–

Ведущая организация –

Защита диссертации состоится « » 2017 г. в часов ____ минут на заседании диссертационного совета Д 212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32, (ауд. 211, Главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного технического университета.

Автореферат разослан « » 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор

Смирнов Виталий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

С каждым годом все шире применяются разнообразные роботизированные автономные мобильные платформы. Для обеспечения их управления при движении по заданной траектории необходимо автономное определение вектора изменяющихся координат. Основой местоопределения в отсутствие доступа к спутниковой информации является применение инерциальных навигационных систем (ИНС). Однако при малых допустимых размерах и весе ИНС нарастающие во времени ошибки существенно ограничивают пространство возможного использования мобильных роботов. Поэтому становятся крайне важными любые дополнительные данные о местоположении, которые могли бы повысить точность определения координат. Такими данными могут быть последовательности изображений окружающей территории, наблюдаемой с помощью автономных средств. При этом необходимо по разнице между изображениями в такой последовательности определять относительное перемещение мобильной платформы. Учитывая изменение угла наблюдения, яркости и вида каждого из последующих изображений, становится ясно, что извлечение навигационной информации является достаточно сложной задачей. Можно сформулировать ее как задачу поиска параметров преобразования, которое трансформирует точки одного изображения на соответствующие точки другого изображения. Создание методов и алгоритмов оценки изменяющихся параметров пространственных деформаций рассматривалось в работах ряда российских и зарубежных исследователей, среди которых следует особо выделить труды Васильева К.К., Киричука В.С., Крашенинникова В.Р., Ташлинского А.Г., Хуанга Т. (Huang T.S.), Нетравали А. (Netravali A.N.) и Робинса Д. (Robbins J.D.). Однако практически отсутствуют работы, посвященные применению методов обработки изображений применительно к решению задачи определения координат автономных аппаратов.

Таким образом, существует актуальная научная задача повышения эффективности управления автономными аппаратами за счет применения бортовых устройств технического зрения, включающих вычисление параметров деформаций изображений окружающей обстановки.

Диссертационное исследование соответствует направлению «Информационно-навигационные системы» из перечня критических технологий Российской Федерации, а также направлению «Информационно-телекоммуникационные системы» из списка приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации.

Целью исследования является повышение точности устройства управления автономных аппаратов за счет информации с предлагаемого датчика перемещения, включающего источник и систему обработки последовательности изображений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. На основе анализа существующих бортовых средств получения последовательностей изображений и методов определения их параметров предложить принцип действия датчика перемещения для системы автоматического управления движением автономного аппарата.
2. Разработать и исследовать алгоритмы оценки координат и параметров смещения объектов, наблюдаемых в последовательностях изображений, а также алгоритмы оценивания собственных изменяющихся координат по результатам обработки изображений.
3. Проанализировать структуру системы управления движением по заданной траектории, включающей новый датчик перемещения, позволяющий определять изменение вектора состояния аппарата по результатам обработки последовательностей наблюдаемых изображений.
4. Провести анализ возможностей применения создаваемых электронных карт местности для определения абсолютных координат аппарата на базе новых математических моделей последовательностей изображений городской застройки.

5. Разработать аппаратно-программный комплекс определения местоположения в виде отдельного элемента – «датчика перемещения», входящего в систему автоматического управления движением автономного аппарата.
6. Создать комплекс программ для моделирования системы управления аппаратом в виртуальном пространстве и оценки эффективности найденных алгоритмов в различных условиях.

Методы исследований. При решении поставленных задач в диссертационной работе использовались методы вычислительной математики, математической статистики, численной аппроксимации функций и статистических испытаний. Для реализации и моделирования предложенных алгоритмов применялись средства современной информатики и вычислительной техники, включая среду программирования Visual Studio, а также программные средства работы с графическими изображениями.

Научная новизна результатов

1. Предложен принцип действия датчика перемещения для системы управления автономного аппарата на основе обработки последовательностей изображений окружающей среды, полученных с помощью пространственного дальномера.
2. С применением численных псевдоградиентных методов разработаны быстрые алгоритмы обработки последовательности изображений для решения задач навигации автономного аппарата в реальном масштабе времени с помощью бортового компьютера.
3. Разработаны и проанализированы алгоритмы оценивания траектории автономного аппарата с помощью обработки изображений, полученных с пространственного дальномера, с учетом реальных погрешностей, возникающих при его использовании.
4. С помощью математического моделирования и реальных экспериментов проведен анализ эффективности применения предложенного датчика перемещения на борту автономного аппарата.
5. Предложены математические модели последовательностей изображений техногенных зон, позволяющие осуществить анализ эффективности алгоритмов местоопределения на основе электронных карт местности.
6. Разработан комплекс программ для моделирования системы управления аппаратом с предложенным датчиком перемещения в виртуальном пространстве и оценки погрешностей местоопределения в различных условиях.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в следующем:

Предложенный датчик перемещения может быть непосредственно использован для улучшения оценки местоположения автономного аппарата как автономно, так и при комплексировании с данными ИНС или спутниковых навигационных систем. Разработанные комплексы программ позволяют проектировать системы управления движением автономного аппарата и обеспечивают возможности моделирования и обработки потока данных пространственного дальномера.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структура, принцип действия, технические характеристики элемента системы автоматического управления автономным аппаратом – датчика перемещения, позволяющего обеспечить работу в режиме реального времени и получить погрешности местоопределения порядка 0,3-4,6 метра при длительных наблюдениях.
2. Алгоритмы оценивания перемещения автономного аппарата в режиме реального времени по результатам межкадровой обработки изображений с помощью псевдоградиентных алгоритмов оценивания деформаций.
3. Предложенные оценки координат по нескольким наблюдаемым объектам, позволяющие формировать гибкие решения для определения положения автономного аппарата и объектов в динамической среде и повысить точность местоопределения до 20-50 %.

4. Новые математические модели изображений техногенных объектов для построения электронной карты местности и моделирования устройств автоматического управления движением аппарата по заданной траектории.
5. Комплекс программ для моделирования автоматической системы управления движением мобильной платформы с автономным датчиком ее перемещения, позволяющий получить оценки погрешностей управления в разнообразных условиях.
6. Результаты исследования особенностей функционирования датчика перемещения в системах автоматического управления автономными аппаратами.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались, получили положительную оценку, включая дипломы за лучший доклад:

- на Международных конференциях: «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий- REDS» (Москва, 2015, 2016);
- на Всероссийских конференциях: «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск, 2013, 2015);
- на «XIU Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием – КИИ», (Казань, 2014);
- на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава УлГТУ 2013-2016 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 3 работы в изданиях, включенных в перечень ВАК, 8 работ в трудах и материалах Международных и Всероссийских конференций.

Структура и объем работы. Основное содержание диссертационной работы изложено на 150 страницах машинописного текста, содержит 125 рисунков, 1 таблицу и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 122 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цели и основные задачи диссертационной работы, показана научная новизна и практическая ценность, представлены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен аналитический обзор особенностей методов навигации и управления для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в случае отсутствия сигнала спутниковой навигационной системы или при значительных ошибках, связанных с ее использованием. Отмечено, что применение только инерциальных навигационных систем (ИНС) в этих условиях приводит к постоянно нарастающим ошибкам. Обоснована перспективность применения методов местоопределения, использующих информацию с бортовых видеокамер и пространственных дальномеров. Применение этих методов сопряжено с необходимостью быстрой бортовой автоматической обработки регистрируемого материала, включая оценивание межкадрового сдвига, обнаружение и отслеживание наблюдаемых объектов. Проведен аналитический обзор известных методов и алгоритмов регистрации и совмещения изображений, в частности, сделан анализ моделей, применяемых в настоящее время для описания параметров пространственно-временных деформаций последовательностей изображений и оценки параметров движения. Выявлено два основных класса таких алгоритмов. Первый основан на процедурах ВМА (Block Matching Algorithms), второй - на анализе градиента взаимной корреляционной функции кадров изображений. Кратко описаны известные алгоритмы разрешения объектов на изображениях, выравнивания изображений, регистрации последовательности изображений и стабилизации изображений с помощью процедур оценки деформаций.

Обсуждены известные методы и алгоритмы оценивания сдвига, поворота и масштаба в паре изображений. Рассмотрены изменения во временной последовательности изображений, полученных с бортовой камеры движущегося аппарата. Отмечено, что при небольших межкадровых перемещениях аппарата и малом изменении содержания сцены приближенная оценка смещения может быть записана в виде:

$$g(x, y) = \arg \max_{\Delta x \Delta y} (\min) f(x - \Delta x, y - \Delta y) . \quad (1)$$

В заключении первой главы сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе дано описание контроллера Kinect и получаемых с его помощью данных, разработан способ перевода данных контроллера в последовательность двумерных изображений, исследованы пути обработки этих изображений с помощью численных псевдоградиентных процедур, разработаны алгоритмы для оценки траектории летательного аппарата, обнаружения объектов на изображении, оценки координат аппарата и объектов в окружающей среде.

Данные, получаемые от контроллера Kinect, являются последовательностью двумерных (320 x 240) массивов расстояний до объектов, наблюдаемых с помощью контроллера (рисунок 1,а). Расстояния определяются как величины временных задержек, прошедших со времени генерации сигнала в инфракрасном диапазоне до момента фиксации отраженного сигнала. Вначале выполним преобразование этих массивов в изображения (рисунок 1,б). Этот процесс определяется выбранным числовым эквивалентом для величины расстояния до объекта и цветом соответствующего пикселя.

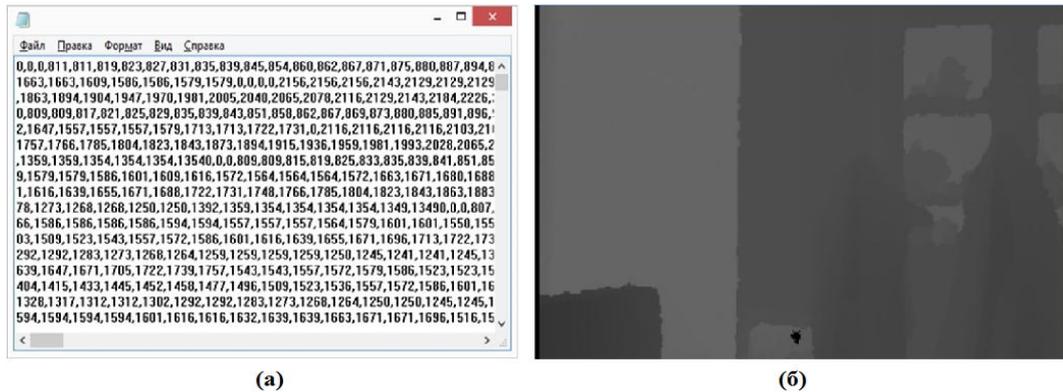


Рис. 1. Данные контроллера Kinect и изображение (320 x 240), полученное в результате преобразования данных

Пусть имеются два кадра с пространственного дальномера $Z^{(1)}$ и $Z^{(2)}$, полученные в следующие друг за другом промежутки времени. Для оценивания пространственного сдвига между $Z^{(1)}$ и $Z^{(2)}$ воспользуемся псевдоградиентными процедурами. Эти процедуры могут быть описаны следующим выражением:

$$\hat{\alpha}_{(t+1)} = \hat{\alpha}_t - \Lambda_{(t+1)} \beta_{(t+1)} (J(Z_{(t+1)}, \hat{\alpha}_t)), \quad (2)$$

где α - оцениваемый вектор параметров; t -номер итерации; Λ - матрица приближения; β - псевдоградиент целевой функции J ; $Z_t = \{z_{jt}^{(2)}, z_{jt}^{(1)}\}$ - наблюдения, используемые на t -й итерации; $z_{jt}^{(2)} \in Z^{(2)}$, $jt \in \Omega_j$; $\hat{z}_{jt}^{(1)} = \hat{z}_{jt}^{(1)}(jt, \alpha_{(t-1)}) \in \hat{Z}$ - массив, полученный из наблюдений $Z^{(1)}$ с помощью интерполяции; $\Omega_j = \{(j_x, j_y)^T\}$ - двумерная сетка индексов. При этом наблюдения $Z^{(2)}$ можно представить как функцию $Z^{(1)}$, смещений по горизонтали (Δx) и вертикали (Δy), изменений угла поворота ($\Delta \theta$) и масштаба (ΔM):

$$Z^{(2)} = f(Z^{(1)}, \Delta x, \Delta y, \Delta M, \Delta \theta) . \quad (3)$$

Для оценки качества совмещения с помощью псевдоградиентных алгоритмов изображений, полученных с помощью пространственных дальномеров, предложено использовать «разрывную» авторегрессионную математическую модель следующего вида:

$$x_{ij} = \text{ROUND}[(\rho_1 x_{(i-1)j} + \rho_2 x_{i(j-1)} - \rho_1 \rho_2 x_{(i-1)(j-1)} + \sqrt{(1-\rho_1^2)(1-\rho_2^2)} \xi_{ij})n] / n, \quad (4)$$

где операция *ROUND* обозначает округление до целого числа. Предложенная модель позволяет формировать неоднородные изображения, близкие по своим свойствам к изображениям, получаемым с помощью пространственного дальмера (рисунок 2).

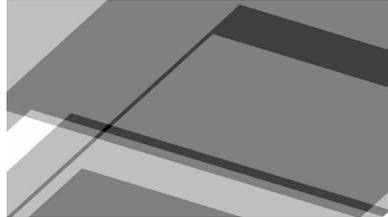


Рис.2. Реализация «разрывной» авторегрессионной модели

Использование модели (4) позволяет решить задачу идентификации параметров на основе решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} C_n = \Phi\left(\frac{1}{2n\sigma_\xi\sqrt{2(1-\rho^2)}}\right) \\ D_x = \sigma_\xi^2 + \frac{1}{12n^2(1-\rho^2)} \\ R(1) = \rho\left(\sigma_\xi^2 + \frac{1}{12n^2}\right) \end{cases},$$

где C_n - число пар элементов изображения $x_i x_{i-1}$, в которых $x_i = x_{i-1}$; D_x - дисперсия изображения; $R(1)$ - ковариация между соседними элементами изображения.

Для выделения объектов предложено использовать модифицированный гистограммный метод, основанного на вычислении значений яркости в каждой строчке изображения и подсчета числа этих значений (рисунок 3). Метод имеет недостаток, связанный с анализом только яркостных характеристик объекта, однако практика обработки большого количества изображений показывает высокую эффективность обнаружения.

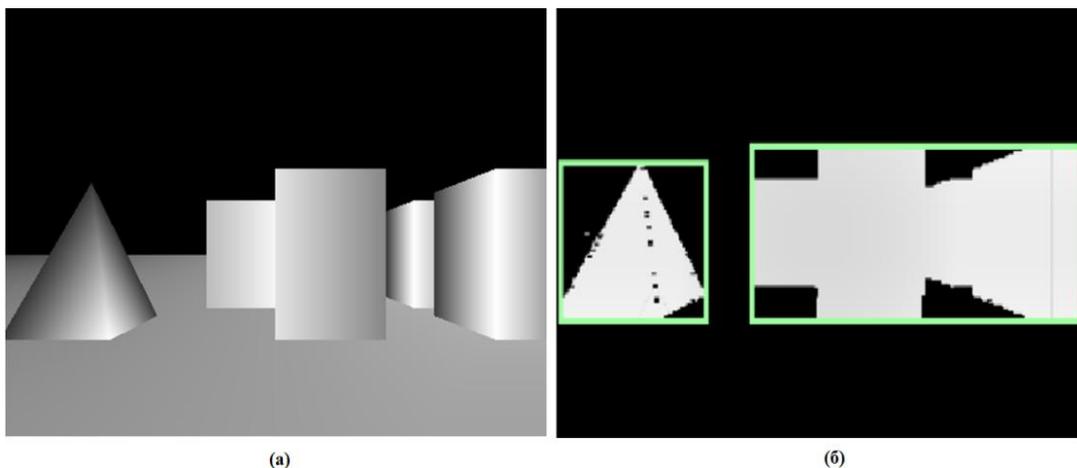


Рис. 3. Пример изображения с несколькими объектами и результат распознавания объектов

Для определения местоположения аппарата и различных объектов, регистрируемых с помощью установленной на аппарате камеры, будем использовать сферическую систему

координат (ρ, θ, φ) . Для их оценки на основе средних значений смещений $\overline{\Delta x}$ и $\overline{\Delta y}$ можно использовать следующие формулы:

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{M \{ \overline{\Delta x} \}}{\rho} \right] = \sin^{-1} \left[\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta x_i) / N}{\rho} \right], \quad (5)$$

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{M \{ \overline{\Delta y} \}}{\rho} \right] = \sin^{-1} \left[\frac{(\sum_{i=1}^N \Delta y_i) / N}{\rho} \right]. \quad (6)$$

Эти оценки содержат случайные погрешности, вызванные следующими причинами.

- Процесс обнаружения объектов на изображениях, полученных с помощью пространственных дальномеров, сопровождается ошибками определения границ этих объектов и их геометрических центров.
- Оценка пространственных деформаций изображений в последовательности содержит естественные для псевдоградиентных процедур погрешности.
- Процесс регистрации изображений приводит к искажениям и шумам.

Процесс оценки траектории связан с объектами, обнаруженными на изображении. Рассмотрим координаты мобильного аппарата (рисунок 4), считая, что центр изображения является началом системы координат для оценки координат всех обнаруженных объектов. На рисунке 5 представлены различные виды перемещения аппарата. Для решения задачи позиционирования по данным инфракрасного дальномера будем считать для определенности, что дальномер направлен вдоль оси аппарата, а его перемещение происходит с достаточно малой скоростью, так что мала разница между получаемыми кадрами изображений. Будем считать также, что аппарат перемещается только вперед и назад без совершения поворотов и кренов. Обозначим горизонтальный и вертикальный угол обзора дальномера через α , и тогда горизонтальное и вертикальное угловые разрешения устройства составляют $H_x = \alpha / i_{\max}$ и $H_y = \alpha / j_{\max}$, где i_{\max}, j_{\max} – пространственное разрешение обрабатываемых изображений по горизонтали и вертикали. Если, например, $\alpha = 120^\circ$, $i_{\max} = 320$, $j_{\max} = 240$ то $H_x = \frac{120}{320} = 0.375^\circ$ и $H_y = \frac{120}{240} = 0.5^\circ$.

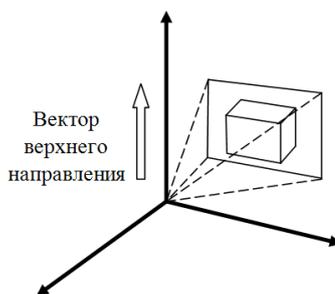


Рис.4. Направления осей камеры

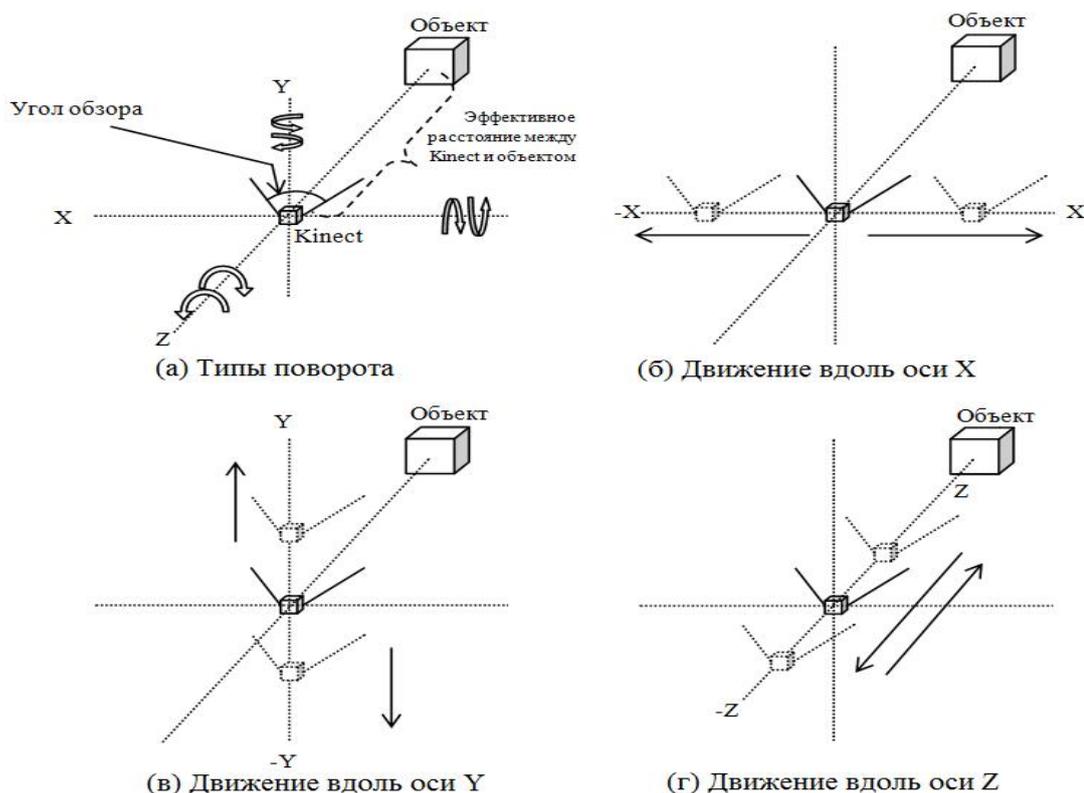


Рис.5. Типы перемещения аппарата

Поскольку фактическое расстояние ρ до объекта в точке $i_{об}, j_{об}$ определяется значением в этой точке, это преобразование позволяет определить фактические координаты этого объекта с помощью следующих несложных геометрических преобразований:

$$\left. \begin{aligned} x_{об} &= x_0 + \rho \cdot \sin(\vartheta_x) \\ y_{об} &= y_0 + \rho \cdot \cos(\vartheta_y) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где $\vartheta_x = \Delta i \cdot H_x, \vartheta_y = \Delta j \cdot H_y$ – горизонтальный и вертикальный углы обзора объекта; $\Delta i = (i_{max}/2) - i_{об}, \Delta j = (j_{max}/2) - j_{об}$ – разница в пикселях между центром объекта и центром изображения. Тогда новые координаты самого аппарата в момент регистрации второго кадра

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_{об} - \rho^{(2)} \cdot \sin(\vartheta_x^{(2)}) \\ y_2 &= y_{об} - \rho^{(2)} \cdot \cos(\vartheta_y^{(2)}) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где $\rho^{(2)}$ – расстояние между аппаратом и объектом на втором кадре, $\vartheta_x^{(2)}, \vartheta_y^{(2)}$ – горизонтальный и вертикальный угол обзора объекта. Для получения траектории перемещения аппарата достаточно выполнить сложение полученных таким образом элементарных смещений. В случае нескольких объектов оценка их координат будет выполняться аналогичным способом. Полученные таким образом оценки координат аппарата можно усреднить:

$$\left. \begin{aligned} x_k &= \frac{\sum_{t=1}^n x_{k_t}}{n} \\ y_k &= \frac{\sum_{t=1}^n y_{k_t}}{n} \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

В третьей главе представлены результаты анализа алгоритмов обработки последовательностей смоделированных и реальных изображений различных объектов, полученных от контроллера Kinect, процедур поиска и идентификации объектов на

изображениях, применения датчика перемещения аппарата при различном расположении объектов в окружающей среде.

На рисунке 6,а представлены зависимости СКО ошибки оценивания от размеров изображения и количества оцениваемых параметров (сдвиг по одной оси – нижняя кривая на графике или по двум осям - верхняя кривая на графике). На рисунке 6,б приведен график времени обработки в зависимости от величины размера изображения.

Анализ самого времени обработки (менее 1 секунды) свидетельствует о потенциальной возможности применения данных алгоритмов в системах реального времени, а точность существенно не зависит от геометрических размеров самого изображения (менее 0.3 пикселей в большинстве случаев).

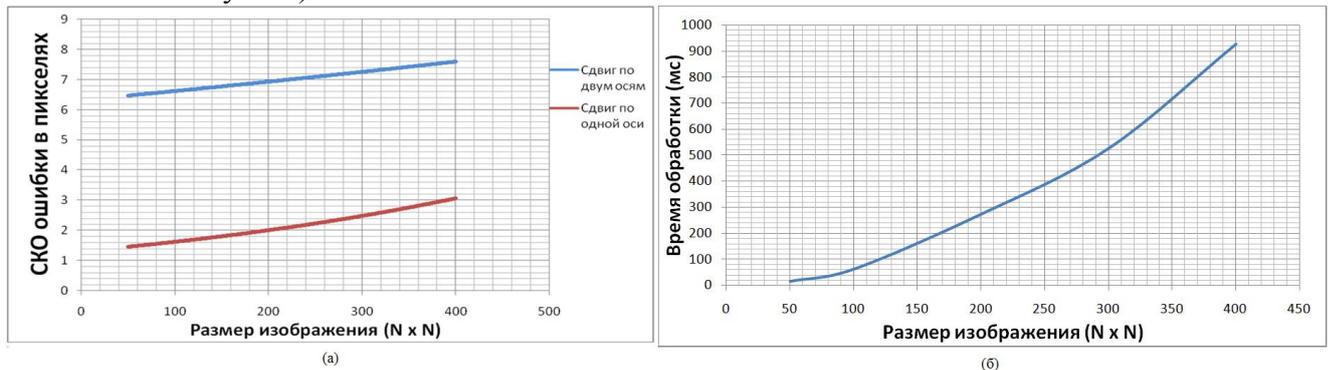


Рис. 6. СКО ошибки оценивания и время обработки вычисляется для разных размеров

Рассмотрим последовательность изображений $Z^{(n)}$ с пространственным разрешением 500x500 и общим количеством изображений 146. Пусть эти изображения получены сдвигом на один пиксел предыдущего изображения в последовательности. Выполним совмещение всех изображений в последовательности с помощью псевдоградиентных алгоритмов и сформируем соответствующую электронную карту (рисунок 7).

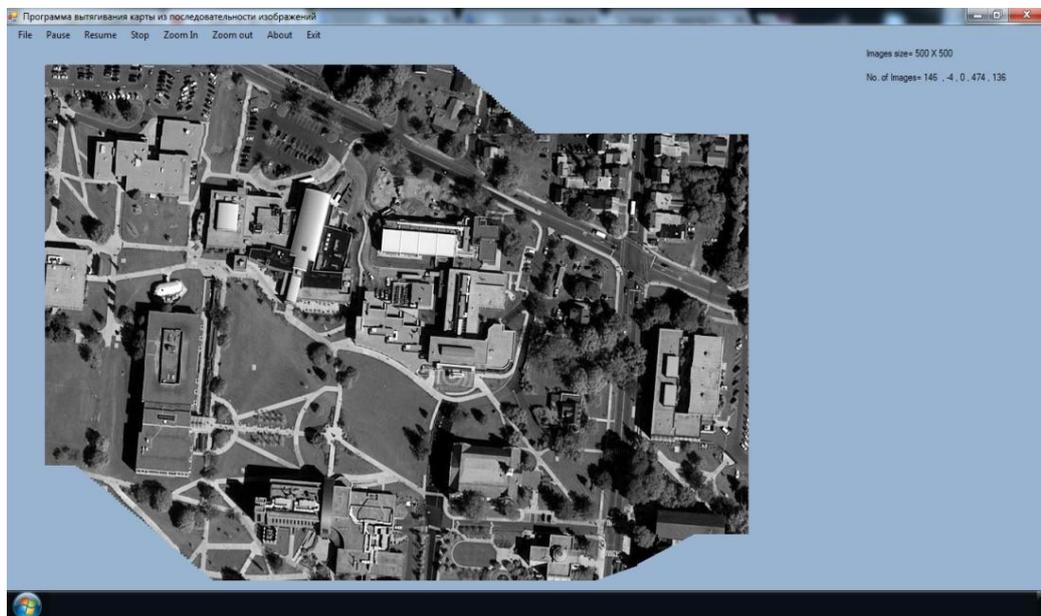


Рис. 7. Электронная карта местности

Будем считать, что, регистрирующее окружающую обстановку устройство перемещается в двух направлениях: «вперед-назад», что соответствует изменению расстояния между камерой и объектом, и «в сторону», что соответствует изменению расстояния между центром регистрируемого изображения и объектами на нем. Применяя к полученным изображениям псевдоградиентные алгоритмы, можно получить ряд зависимостей, характеризующих точность совмещения изображений и, как следствие, точность потенциально возможной навигации.

Так, на рисунке 8,а,б показаны зависимости СКО ошибки оценки от величины сдвига, а на рисунке 8,в,г - СКО ошибки оценки масштаба и угла поворота между изображениями.

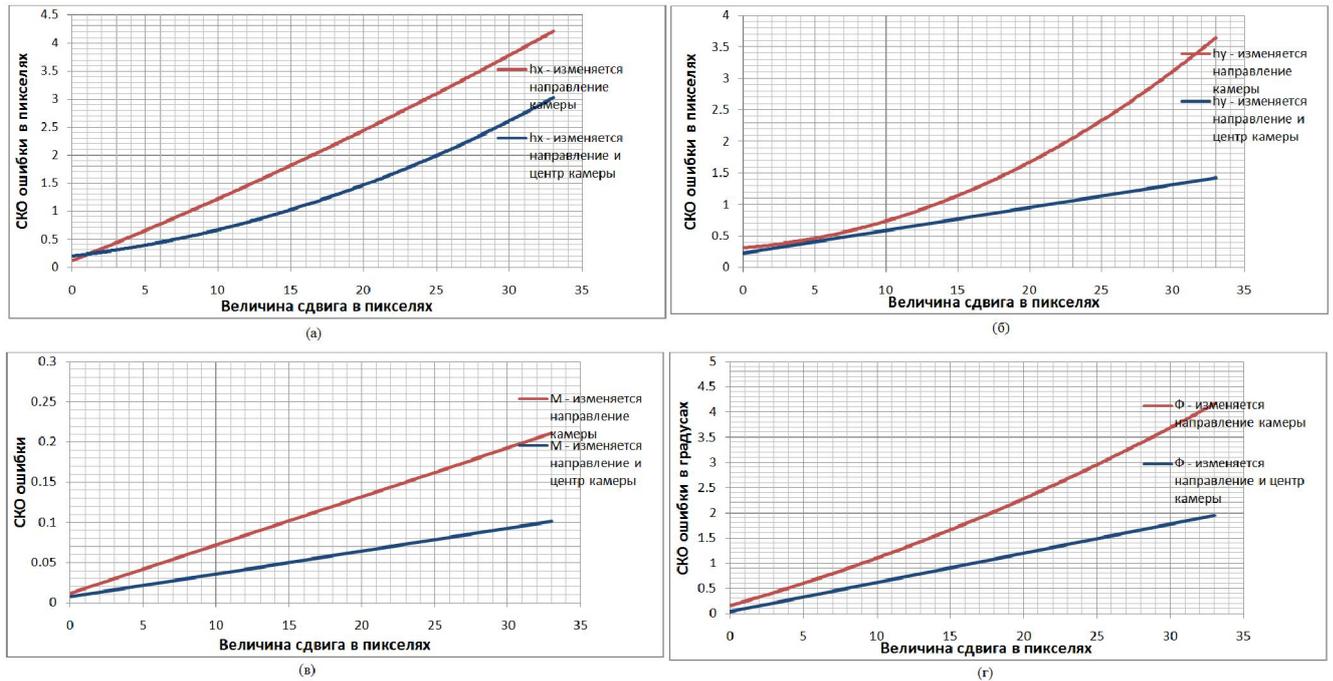


Рис. 8. СКО ошибки оценивания смещения изображений

Анализ показывает, что использование псевдоградиентных алгоритмов позволяет с высокой эффективностью производить обработку изображений, полученных с инфракрасного дальномера Kinect.

Рассмотрим влияние шумов на качество обработки. Будем использовать несколько фильтров для того, чтобы минимизировать влияние этого шума. На рисунке 9 показаны СКО ошибки оценивания до и после использования фильтра при сдвиге изображений по одной оси.

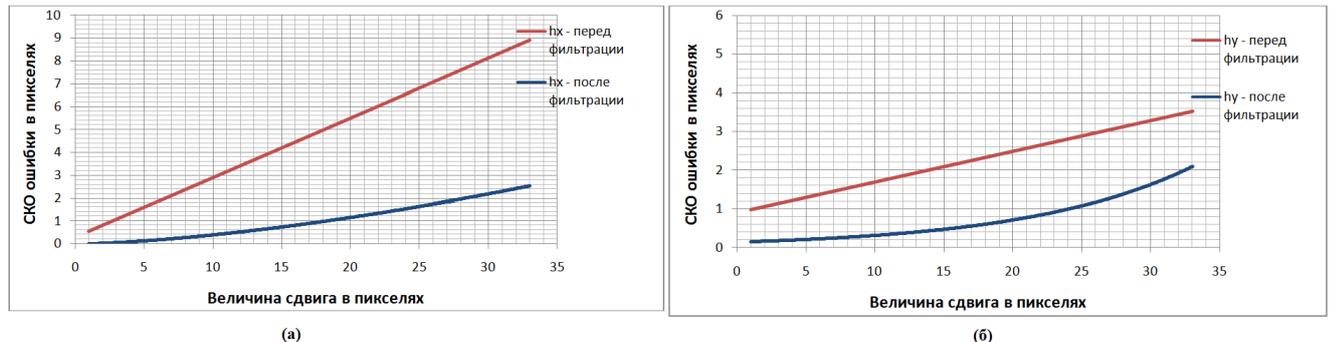


Рис. 9. СКО ошибки оценивания до и после использования фильтра

Рассмотрим анализ алгоритмов оценки сферических координат объектов. Пусть аппарат либо перемещается по этой сцене вдоль собственной продольной оси вперед или назад либо поворачивает в горизонтальной плоскости. На рисунке 10 представлены результаты оценивания СКО ошибки при оценивании угла поворота аппарата (оцениваются смещения по одной оси x). Значения углов зависят от величин сдвига, полученных с помощью псевдоградиентного алгоритма. На рисунке 11 представлены результаты исследования оценивания до и после использования фильтра при сдвиге изображений по одной оси.

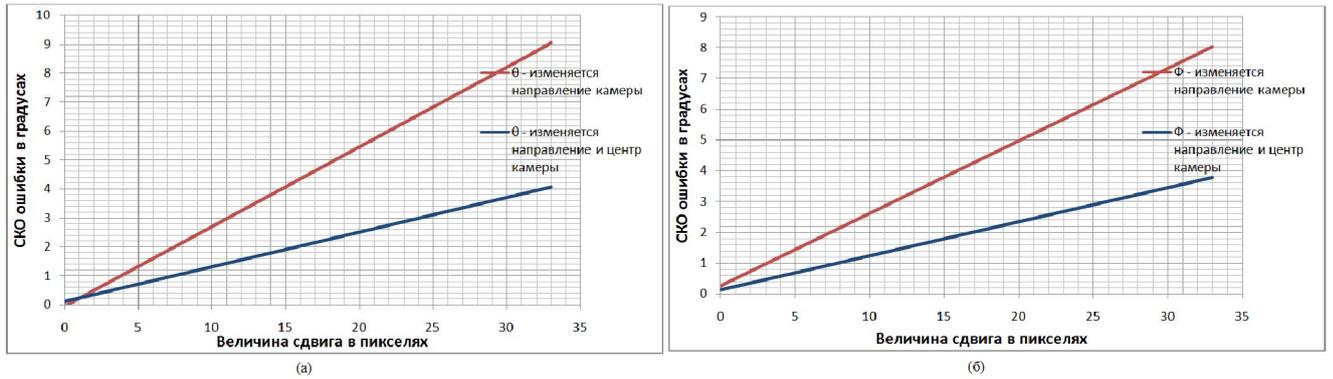


Рис. 10. СКО ошибки при оценивании угла поворота аппарата

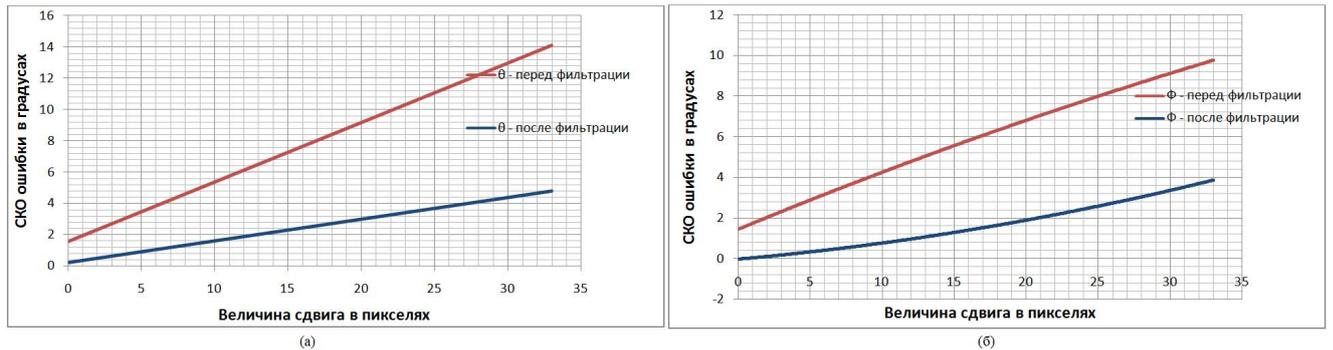


Рис. 11. СКО ошибки оценивания угла поворота аппарата при использовании фильтра

Рассмотрим еще два способа, позволяющие оценить траекторию перемещения. Первый заключается в определении расстояния до объекта по яркости точки, соответствующей геометрическому центру этого объекта. Во втором траектория определяется на основе использования характеристик параметров деформации. На рисунке 12 представлены результаты оценивания траектории. Первой кривой является реальная траектория движения аппарата. Вторая и третья соответствуют двум описанным выше способам оценивания траектории. Четвертая кривая – результат комплексирования двух оценок.



Рис. 12. Оценки траектории при продольном перемещении

На рисунке 13 представлены абсолютные разницы в расстоянии между реальной траекторией и ее оценками. Анализ кривых показывает, что оценка по первому способу является более точной, чем во втором случае.

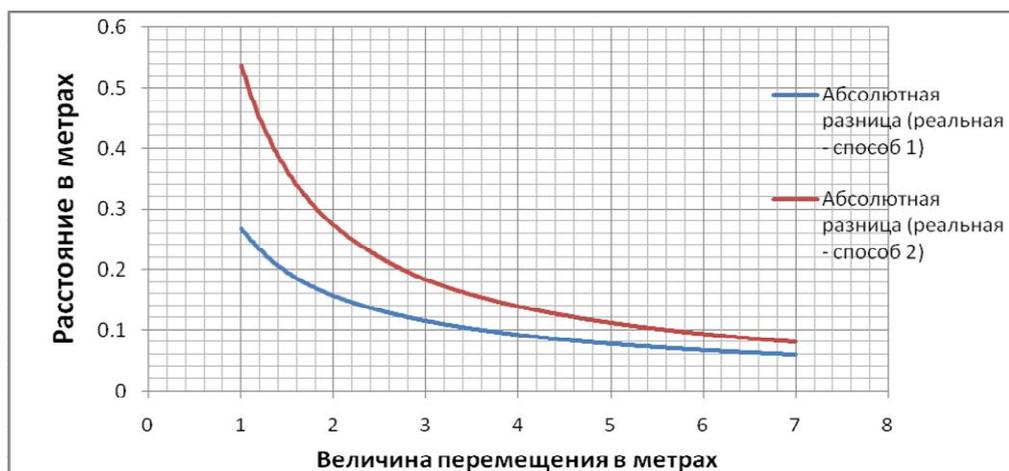


Рис. 13. Абсолютные различия между траекториями

На рисунке 14,а представлены результаты оценивания траектории движения аппарата в первом случае. Первая и третья кривая являются реальной траекторией перемещения аппарата. Вторая и четвертая кривая соответствуют наилучшей оценке траектории по результатам обработки изображений первого и второго объектов соответственно. На рисунке 14,б приведены результаты комплексирования оценки на основе наблюдения двух объектов.

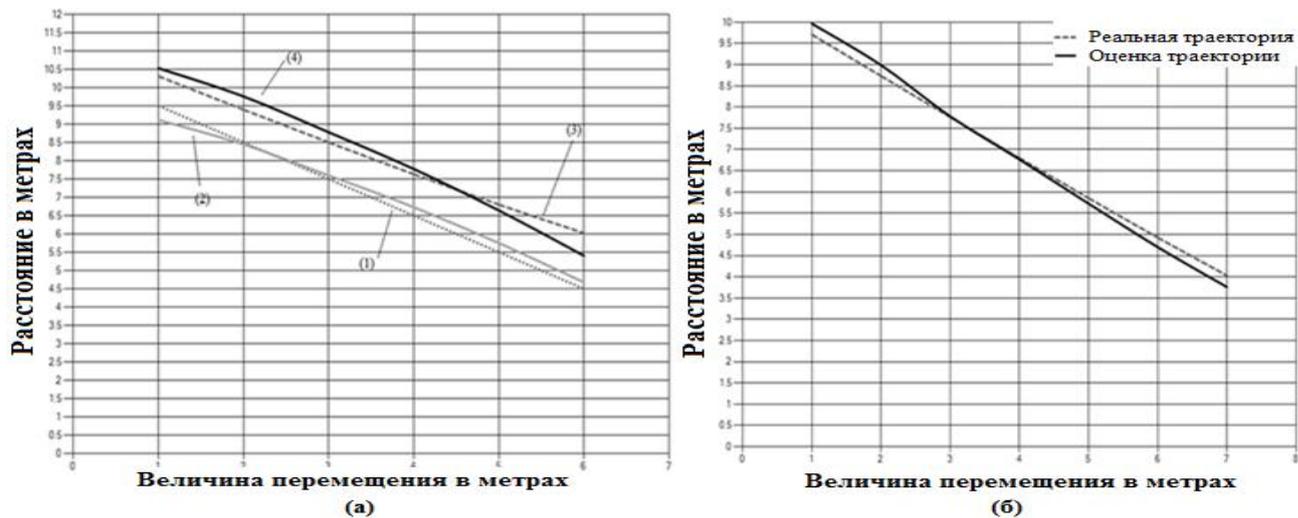
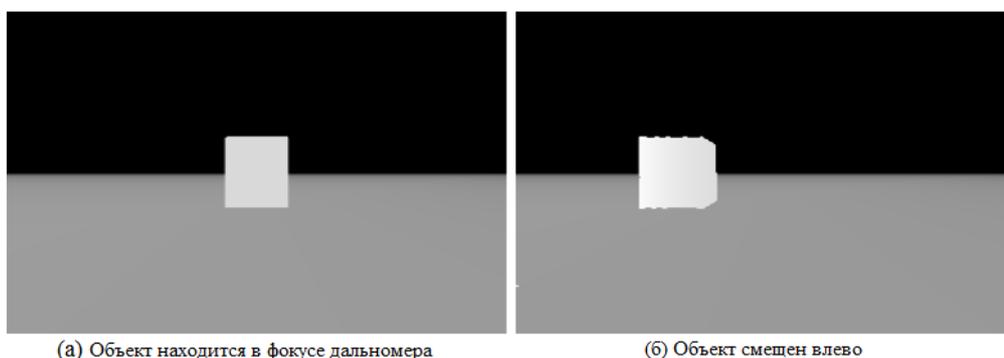


Рис. 14. Оценки траектории аппарата

В диссертации проведено моделирование оценивания координат для случая наблюдения трех объектов. Установлены величины выигрышей за счет комплексирования таких оценок.

Для анализа алгоритмы оценки координат камеры и объектов, рассмотрим сравнение двух случаев, когда объект находится в фокусе дальномера и когда он смещен вправо или влево (рисунок 15).



(а) Объект находится в фокусе дальномера

(б) Объект смещен влево

Рис. 15. Примеры изображений с объектом привязки

На рисунке 16 представлены результаты оценивания координат аппарата относительно первого и второго объектов при условном перемещении вперед на 4 единицы. Анализ кривых показывает, что возникающая при оценивания ошибка возрастает существенно медленнее, чем в инерциальных навигационных системах.

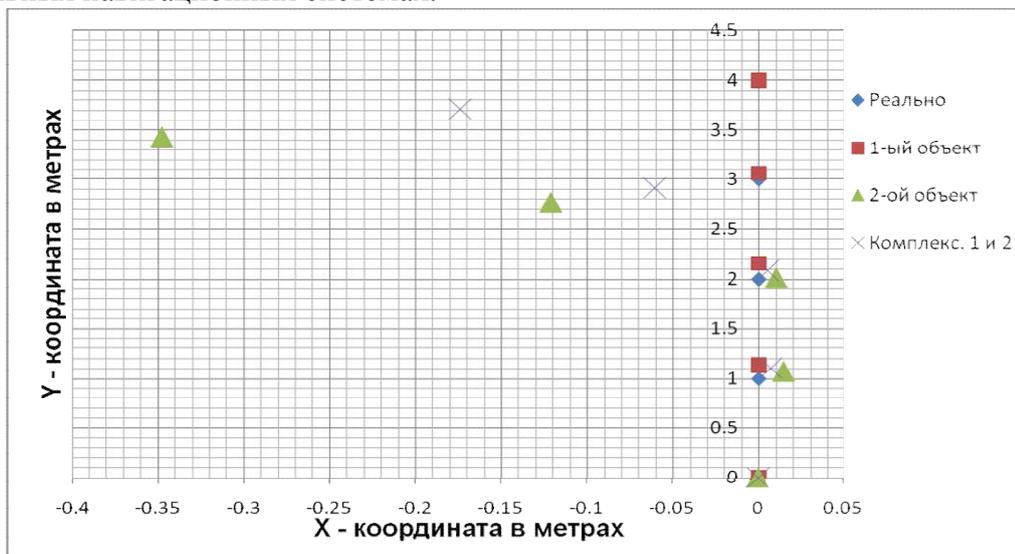


Рис.16. Результаты оценивания координаты аппарата

Для исследования погрешностей, возникающих при смещении наблюдаемого объекта относительно центра камеры, были проведены серии испытаний, заключающихся в осуществлении большого количества виртуальных «пролетов» аппарата над 3D сценой. Установлено, что зависимости дисперсии ошибки оценивания от величины удаления объекта от центра изображения близки к квадратичным кривым.

В случае большого количества наблюдаемых объектов возможна ситуация, показанная на рисунке 17,а, заключающаяся в наложении изображений этих объектов друг на друга. Тогда результат процедуры обнаружения приведет к выделению одного большого объекта (рисунок 17,б). Существует два способа отбора: во-первых, деление ширины объекта на N частей с равными расстояниями между ними, а во-вторых, выбор N точек в области середины объекта. В случае первого способа при $N=3,4,5,\dots$, т.е. на поверхности объекта необходимо выбрать 3 точки, расположенные на условной горизонтальной линии, разделяющей объект на две равные части – верхнюю и нижнюю. Среднее значение всех оценок представляет собой окончательную оценку координат аппарата. В случае второго способа при $N=3,4,5,\dots$ среднее значение всех оценок представляет собой окончательную оценку координат аппарата.

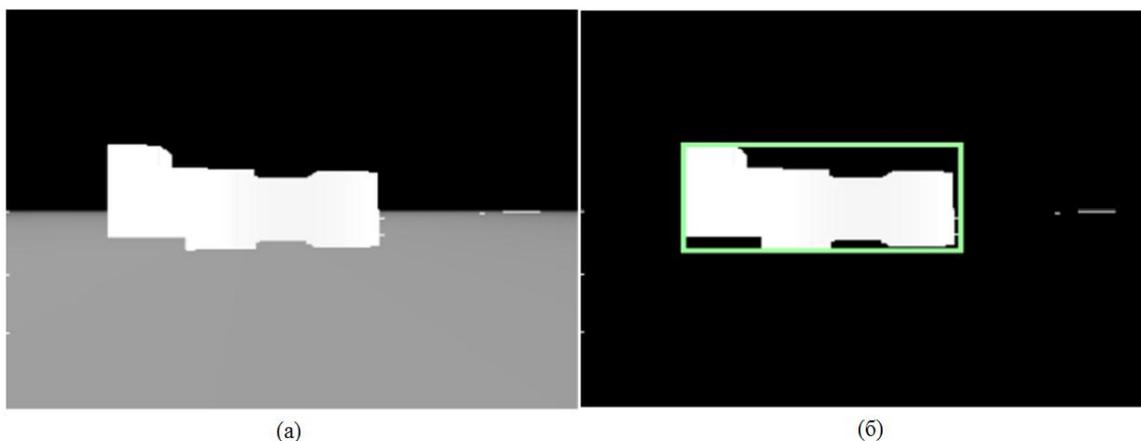


Рис. 17. Результаты обнаружения объектов

Четвертая глава содержит две основные части. В первой рассмотрено описание датчика перемещения, интегрированного в комплекс управления мобильной платформы и предложены

способы его конфигурации для обработки реальных данных. Во второй дано описание среды программирования, в которой производились моделирование и оценка эффективности алгоритмов, а также анализ трудностей создания этого программного обеспечения.

Для практических приложений необходимо выполнять определенные требования, обеспечивающие реализуемость разработанной системы на борту современных и перспективных мобильных аппаратов. Сложность аппаратных средств варьируется от очень простых вариантов, например, программируемых микросхем (FPGA) до сложных распределенных вычислительных систем. Возможный вариант такой системы представлен на рисунке 18.

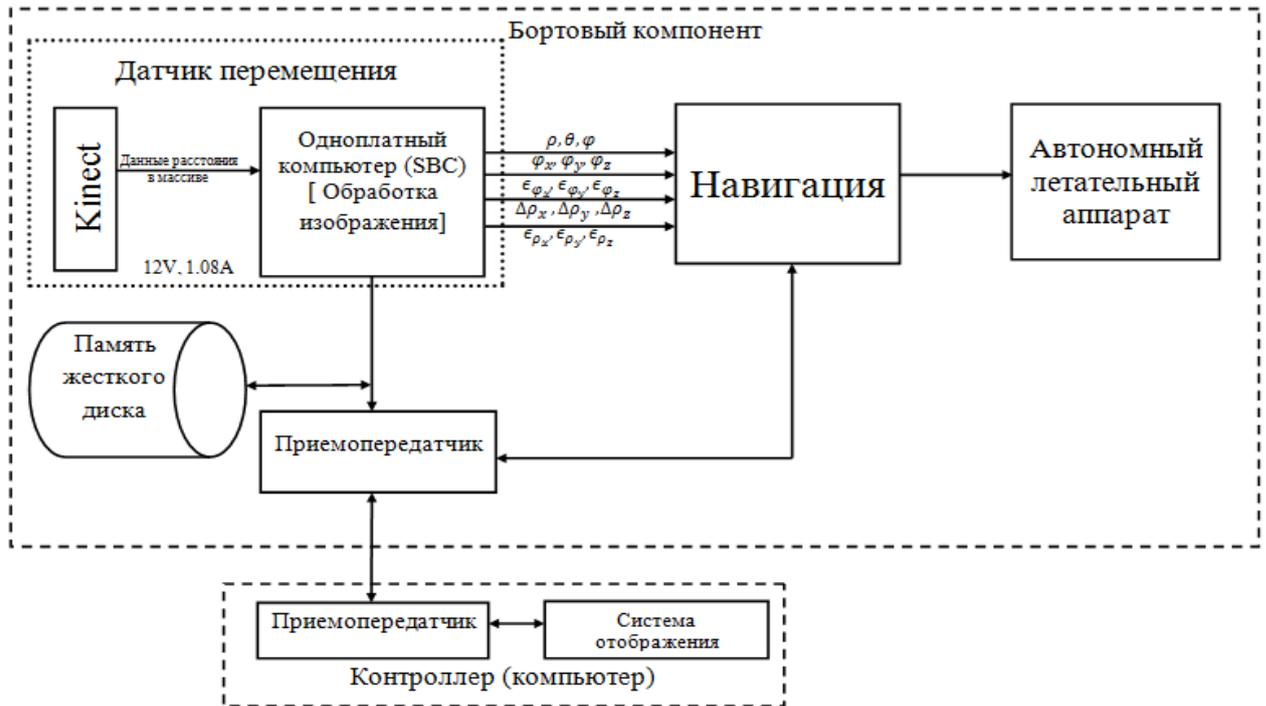


Рис. 18. Общая архитектура системы

Процедуры, реализованные в одноплатном компьютере (SBC), можно описать основными этапами, на представленными на рисунке 19. На рисунке 20 приведена общая структура навигационной системы с комплексированием обработки данных, полученных от нескольких источников, основным из которых во многих случаях может оказаться предлагаемый датчик перемещений автономного аппарата на основе обработки изображений.

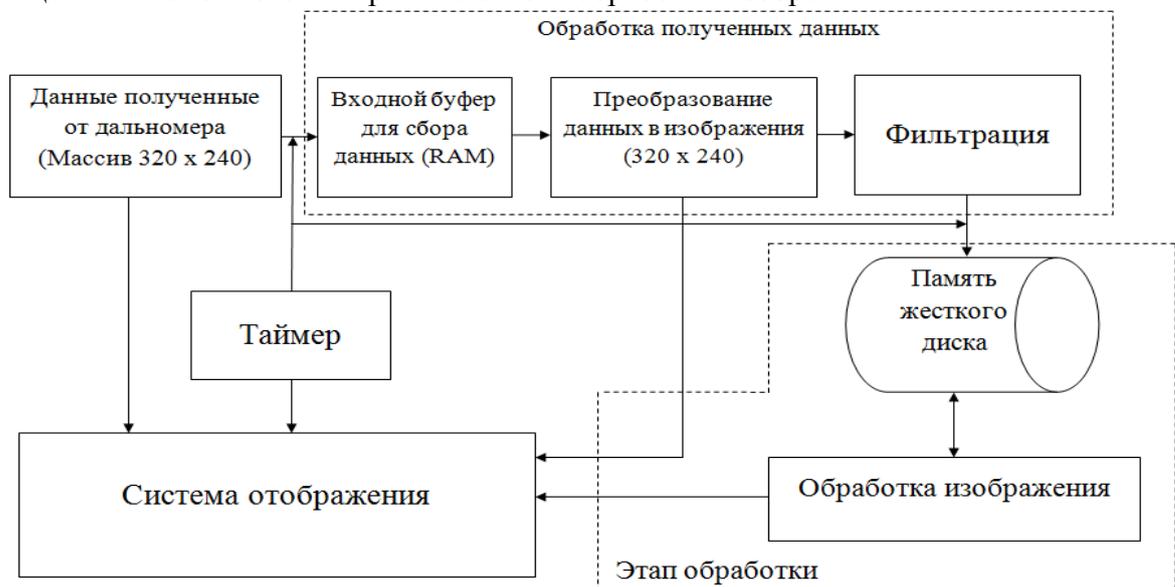


Рис.19. Основные операции, выполняемые на SBC

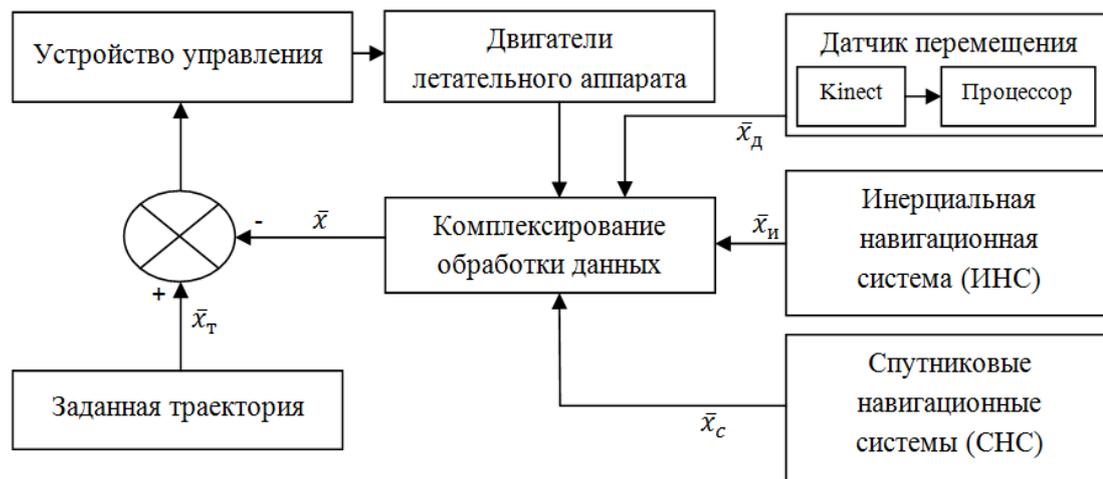


Рис. 20. Система управления аппаратом с датчиком перемещения

Для реализации предложенных алгоритмов необходимо выбрать гибкую среду программирования, позволяющую организовать процедуры обработки изображений, выполнять проектирование GUI интерфейса и перенести полученную реализацию на одноплатные решения. Результаты оценивания параметров движения после обработки пары изображений показаны на рисунке 21. Анализ графиков показывает, что точность зависит от числа итераций, т. е. длительности времени обработки. Чем больше итераций, тем больше точность и продолжительнее время их выполнения. Первый график является результатом оценки сдвига (hx, hy). На втором и третьем графике представлены результаты оценивания угла поворота и масштаба. Полученные результаты используются далее для оценки траектории. Типичное изображение, используемое в программе для построения электронной карты, показано на рисунке 7.



Рис. 21. Результаты работы программы оценивания параметров смещения

На рисунке 22 представлены результаты использования программы для оценивания траектории при перемещении аппарата в двух направлениях: «вперед-назад» и «в сторону». Информация о координатах аппарата и полярных координат объектов представлена в отдельном окне. Точность оценивания траектории, отображаемой в программе, зависит от длительности регистрации движения.

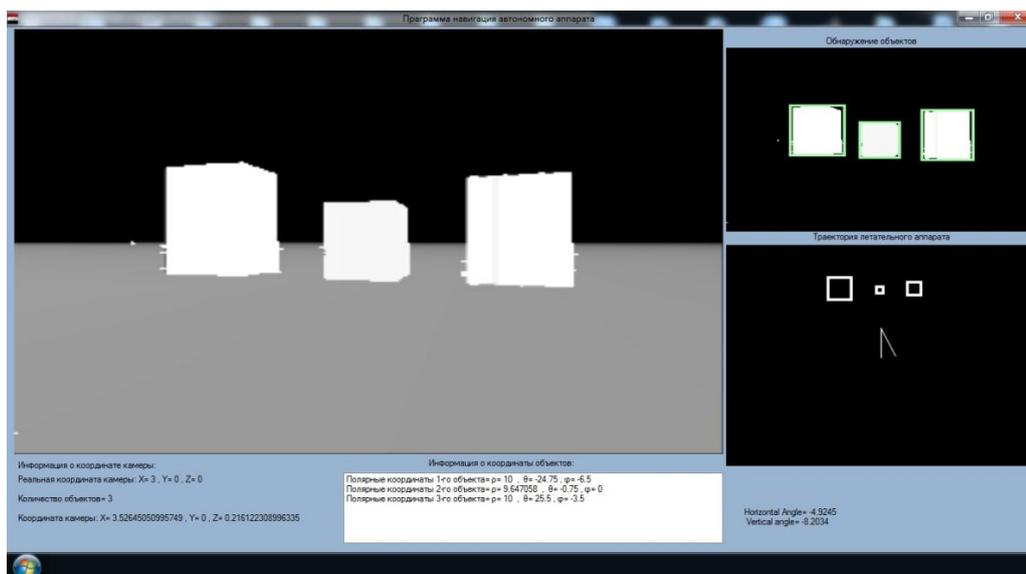


Рис. 22. Главное окно программы при повороте аппарата

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

1. Разработано устройство системы управления автономного аппарата – датчик перемещения на основе численных псевдоградиентных процедур обработки последовательностей изображений окружающей среды, полученных с помощью пространственного инфракрасного дальномера Kinect.
2. Проведен анализ ошибок оценивания местоположения аппарата с учетом реальных погрешностей, возникающих при использовании пространственного инфракрасного дальномера. Применение разработанных алгоритмов с использованием псевдоградиентных методов позволяет обеспечить работу в режиме реального времени и получить погрешности местоопределения порядка 0,3-4,6 метра при длительных наблюдениях.
3. Предложенные оценки координат по нескольким наблюдаемым объектам позволяют формировать гибкие решения для определения положения автономного аппарата и объектов в динамической среде и повысить точность местоопределения до 20-50 %.
4. Проведенные исследования показали, что использование предложенного датчика перемещения позволяет принципиально решить проблему местоопределения аппарата при отсутствии спутниковых систем навигации, например, под водой или в туннелях, в том случае, когда имеется возможность получить достаточно контрастные последовательности изображений окружающей среды.
5. Разработаны математические модели изображений техногенных объектов и комплекс программ для построения электронной карты местности и моделирования устройства автоматического управления движением аппарата по заданной траектории с помощью виртуальной среды Visual studio C#, позволившие с помощью статистического моделирования получить необходимые подтверждения эффективности найденных решений.
6. Разработан комплекс программ для моделирования системы управления аппаратом с предложенным датчиком перемещения в виртуальном пространстве и оценки погрешностей местоопределения в различных условиях.
7. Предложены конкретные варианты реализации аппаратно-программного комплекса определения местоположения в виде отдельного элемента – «датчика перемещения», входящего в систему автоматического управления движением автономного аппарата, отличающегося от известных решений относительной простотой и высокой эффективностью.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях.

В изданиях из списка ВАК РФ:

1. Дементьев В.Е., Разработка и анализ алгоритмов оценивания траектории автономных летательных аппаратов по результатам обработки изображений окружающих объектов / Дементьев В.Е., Абдулкадим Х.А., Френкель А.Г. // Радиотехника, 2016, №9. – С. 28–31.
2. Абдулкадим Х.А., Анализ алгоритмов оценивания траектории автономных аппаратов / Абдулкадим Х.А., Васильев К.К., Дементьев В.Е. // Надежность и качество сложных систем, 2016, № 4 (16). – С. 113–120.
3. Дементьев В.Е., Алгоритмы оценивания координат летательных аппаратов с помощью пространственных дальномеров / Дементьев В.Е., Абдулкадим Х.А. // Автоматизация процессов управления, 2017, №1. – С. 51–57.

В других изданиях:

4. Абдулкадим Х.А., Разработка программного обеспечения для решения задачи навигации по видеопоследовательности / Абдулкадим Х.А., Кавеев И.Н. // Сборник научных трудов восьмой Всероссийской научно–практической конференции (с участием стран СНГ) «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем», Ульяновск: УлГТУ, 2013. – С. 76–78
5. Абдулкадим Х.А., Анализ изображений, получаемых с бортовой камеры беспилотного летательного аппарата для его навигации // труды конференции (КИИ–2014) «Четырнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием». Казань, 2014 – Т.3. – С. 243–248.
6. Абдулкадим Х.А., Алгоритмы навигации с применением обработки изображений подстилающей поверхности // «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем», сборник научных трудов. Девятый выпуск. – Ульяновск: УлГТУ, 2014 – С. 98-102.
7. Абдулкадим Х.А., Разработка алгоритма навигации на основе данных инфракрасного дальмера Kinect / Абдулкадим Х.А., Васильев К.К., Дементьев В.Е. // Доклады 70-й Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (REDS–2015)», посвящённая Дню радио, Москва, 2015 – С. 116–119.
8. Абдулкадим Х.А., Особенности совмещения изображений, полученных с помощью пространственного инфракрасного дальмера Kinect // Сборник трудов девятой Всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ), «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем », Ульяновск: УлГТУ, 2015 – С. 119–122.
9. Васильев К. К., Оценивание траектории автономного аппарата по данным, полученным от пространственных дальномеров / Васильев К.К., Дементьев В.Е., Абдулкадим Х.А. // Доклады 71-й Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (REDS–2016)», посвящённая Дню радио, Москва, 2016. – С. 190–193.
10. Васильев К.К., Анализ траектории движения автономного аппарата по результатам обработки последовательности изображений / Васильев К.К., Дементьев В.Е., Абдулкадим Х.А. // Доклады 71-й Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (REDS–2016)», посвящённая Дню радио, Москва, 2016. – С. 193–196.
11. Абдулкадим Х.А., Анализ траектории автономного аппарата по результатам обработки данных пространственного дальмера с минимальной дисперсией ошибки // «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем», сборник научных трудов– Ульяновск: УлГТУ, 2016. – С. 164–167.

Абдулкадим Хуссейн Абдуламир

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
КООРДИНАТ АВТОНОМНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Автореферат

Подписано в печать 28.03.2017. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1.16. Тираж 125 экз. Заказ 163.

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32.