

На правах рукописи



Акопов Эдуард Вячеславович

**СПОСОБ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАТУР
ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГОРОДСКОЙ
МЕСТНОСТИ В ИНТЕРЕСАХ ВИДЕОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
МОБИЛЬНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ АППАРАТОВ**

Специальность: 05.12.04 - «Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2016

Работа выполнена на кафедре радиоуправления и связи ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный университет»

Научный руководитель – **Кириллов Сергей Николаевич**,
заслуженный работник ВШ РФ,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «РГРТУ», зав. кафедрой
Радиоуправления и связи

Официальные оппоненты – **Котов Владислав Викторович**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет», г. Тула, профессор кафедры
Робототехники и автоматизации производства

– **Приоров Андрей Леонидович**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный
университет им. П.Г. Демидова», доцент
кафедры Динамических электронных систем

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых»

Защита состоится «2» декабря 2016 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» и на официальном сайте университета www.rsreu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.211.04
доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В связи с расширением использования мобильных роботизированных аппаратов (МРА) в последние годы возникает потребность в исследовании различных принципов позиционирования данных объектов и разработке соответствующих систем на их основе. Перспективными при отсутствии сигналов спутниковых радионавигационных систем с точки зрения использования в целях локального позиционирования являются способы определения местоположения на основе телевизионных видеоданных об окружающей городской местности, полученных из видеокамер (ВК), расположенных на борту МРА. Исследованиям в области обработки изображений с целью получения информации об окружающей обстановке посвящены работы таких зарубежных ученых, как Д. Форсайт, Дж. Понс, Р. Гонсалес, Р. Вудс, Л. Шапиро, Дж. Стокман и др., а также отечественных исследователей: Сойфера В.А., Визильтера Ю.В., Дворковича А.В., Алпатова Б.А., Бехтина Ю.С., Еремеева В.В., Ключко В.К., Фаворской М.Н., Приорова А.Л. и др. При этом в области видеонавигации и позиционирования на основе изображений работали такие зарубежные ученые, как С. Турн (Стэнфордский университет), В. Бургард (Фрайбургский университет имени Альберта-Людвига), Д. Фокс (Вашингтонский университет), Я. Кошечка, В. Жанг (Университет Джорджа Мейсона). В то время как отечественные исследования в направлении навигации по физическим параметрам окружающей местности производились Джанджгава Г.И. (Московский энергетический институт), В.И. Сырямкиным, В.С. Шидловским, И.Н. Белоглазовым, В.П. Тарасенко (Томский государственный университет), В.К. Баклицким (Московский авиационный институт) и др.

Использование телевизионных систем видеопозиционирования (СВП) обеспечивает следующие преимущества: автономность, так как для организации работы СВП не требуется какой-либо внешней инфраструктуры (спутников, опорных станций и т.п.); малозаметность ввиду отсутствия значительного излучения при работе видеоаппаратуры; устойчивость к электромагнитным воздействиям, в особенности по сравнению со спутниковыми радионавигационными системами; широкое распространение и невысокая стоимость видеокамер по сравнению с радиолокационными и лазерными устройствами.

Наиболее остро преимущества СВП проявляются в городской местности, где методы спутникового позиционирования, и без того уязвимые при воздействии различных помех, дополнительно подвергаются действию таких мешающих факторов, как электромагнитные возмущения, возникающие вследствие работы промышленных установок и телекоммуникационных систем, многолучевость и затенение сигналов спутников высокими зданиями. При этом характер телевизионного изображения (ТИ), полученного МРА в городской местности, в большей степени обусловлен координатами точки

съемки, чем для большинства природных зон (степь, лес, пустыня, тундра и т. п., которые имеют достаточно монотонный вид на больших территориях).

Использование в целях видеопозиционирования МРА контуров рельефа городской местности, представляющих границу между крупными неподвижными объектами, нанесенными на карту, и фоном (небом), обеспечивает такие преимущества, как неизменность информативной части контура, выделенного на ТИ, полученных из одной точки в разное время (при фиксированной ориентации и параметрах ВК); неповторимость контура при изменении координат точки съемки. При этом отдельно можно отметить небольшой объем информации, требуемый для описания контура рельефа местности в виде сигнатур. Вместе с тем при использовании контура рельефа городской местности требуется цифровая карта (ЦК), включающая высоты представленных на ней объектов, а также некоторые данные об ориентации телевизионных ВК во время съемки изображений, причем для улучшения характеристик СВП возможно применение информации о движении МРА. В то же время целесообразно использование видеопозиционирования совместно с иными способами определения координат для обеспечения взаимного дополнения.

Цель и задачи работы. Целью работы является разработка способа и алгоритмов обработки ТИ окружающей среды, обеспечивающих выделение контуров рельефа городской местности при наличии мешающих факторов и мешающих объектов для видеопозиционирования МРА.

В соответствии с поставленной целью при выполнении работы требуется решить следующие задачи:

- разработать алгоритм сегментации ТИ в целях предварительного устранения областей, соответствующих крупным мешающим объектам;
- разработать алгоритм классификации сегментов ТИ в целях предварительного устранения областей, соответствующих крупным мешающим объектам;
- разработать алгоритм выделения элементов контура рельефа городской местности на сегментах ТИ при уменьшении влияния мешающих объектов с малыми угловыми размерами;
- разработать алгоритм распознавания характерных объектов городской местности на ТИ для уменьшения зоны неопределенности при видеопозиционировании;
- обосновать структурную схему алгоритма выделения контуров рельефа городской местности на ТИ;
- разработать алгоритм видеопозиционирования МРА на основе контуров рельефа городской местности при использовании ЦК;
- разработать алгоритм видеопозиционирования МРА на основе контуров рельефа городской местности и информации о параметрах движения МРА при использовании ЦК;

- разработать алгоритм видеоориентации МРА на основе контуров рельефа городской местности и известных координат МРА использующий ЦК;
- произвести анализ технической реализации рассмотренных алгоритмов видеопозиционирования МРА на современной элементной базе.

Научная новизна. При выполнении данной работы получены следующие новые научные результаты:

- предложен способ видеопозиционирования МРА в городской среде на основе контуров рельефа местности, выделенных на ТИ окружающей обстановки, и ЦК;
- обоснована целесообразность использования сигнатур контуров рельефа городской местности и сигнатур неинформативных направлений в интересах видеопозиционирования МРА;
- предложен алгоритм сегментации ТИ в целях предварительного устранения областей, соответствующих крупным мешающим объектам;
- предложен алгоритм классификации сегментов ТИ в целях предварительного устранения областей, соответствующих крупным мешающим объектам, обеспечивающий величину вероятности правильной классификации порядка 0,84;
- предложен алгоритм выделения элементов контуров рельефа городской местности на сегментах ТИ с уменьшением влияния мешающих объектов с малыми угловыми размерами, обеспечивающий значения ошибки выделения элементов сигнатуры контура рельефа местности в пределах 0,63 градуса;
- обоснована структурная схема алгоритма выделения контуров рельефа местности на ТИ окружающей обстановки, при этом экспериментально определенная угловая ошибка выделения сигнатур составила величину в пределах 2,3 градуса;
- предложен алгоритм распознавания характерных объектов городской местности для уменьшения зоны неопределенности при видеопозиционировании, обеспечивающий величину вероятности правильного обнаружения снимка, содержащего объект, составляющую 0,85 при значении вероятности ошибки второго рода, равном 0,05;
- обоснована структурная схема способа видеопозиционирования при наличии дополнительной информации и действии мешающих факторов;
- предложен алгоритм видеопозиционирования на основе контуров рельефа городской местности и ЦК при наличии информации об ориентации МРА относительно горизонтальной плоскости;
- предложен алгоритм видеопозиционирования на основе контуров рельефа местности и ЦК с использованием информации о характеристиках движения МРА;

- предложен алгоритм видеоориентации МРА по азимуту на основе контуров рельефа городской местности и ЦК при известных координатах;
- проведены исследования эффективности уменьшения зоны неопределенности при использовании распознавания характерных объектов городской местности;
- предложен ряд мер по уменьшению вычислительных ресурсов, требуемых на реализацию системы видеопозиционирования МРА.

Методы исследования. В работе использовались методы вычислительной математики, статистической радиотехники, математической статистики, функционального анализа, причем численные исследования сочетались с экспериментальными.

Достоверность. Достоверность представленных результатов обосновывается корректным использованием математического аппарата, а также сопоставлением результатов, полученных при применении численных исследований и экспериментальным путем.

Практическая ценность работы. Предложенные в работе алгоритмы выделения контуров рельефа городской местности на ТИ окружающей обстановки и видеопозиционирования на основе полученной информации, а также меры по уменьшению вычислительных затрат на их реализацию могут быть использованы при создании систем позиционирования МРА.

Результаты диссертационной работы были использованы в ОАО «Российские космические системы» и в учебном процессе ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Способ видеопозиционирования на основе контуров рельефа городской местности, выделенных на телевизионных изображениях окружающей обстановки; цифровой карты; данных об ориентации бортовых ВК в момент съемки относительно горизонтальной плоскости.
2. Алгоритм выделения контуров рельефа местности на телевизионных изображениях городской среды в целях видеопозиционирования МРА при действии мешающих факторов, обеспечивающая величину угловой ошибки определения сигнатур в пределах до 2,3 градуса.
3. Двухэтапный алгоритм видеопозиционирования МРА, использующий на первом этапе последовательный поиск совместно с методом градиентного спуска при постоянном шаге, в целях определения области глобального минимума целевой функции, а на втором этапе – локальную оптимизацию методом градиентного спуска с дроблением шага в интересах уточнения координат. При этом обеспечивается ошибка видеопозиционирования МРА в пределах 0,81 м при использовании видеосистемы, дающей полный круговой обзор по азимуту.

Апробация работы. Результаты исследований, проведенных в данной работе, докладывались на следующих конференциях: 16-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2014», Москва, 2014; XIX ВНТК «Новые информационные технологии», Рязань, 2014; 18-й МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», Рязань, 2015; XX ВНТК «Новые информационные технологии», Рязань, 2015; XVIII МНТК «Математические методы в технике и технологиях», Рязань, 2015; XIX Международном форуме по проблемам науки, техники и образования, Москва, 2015, 18-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2016», Москва, 2016; МНТК «Современные технологии в науке и образовании», Рязань 2016.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 5 в изданиях, рекомендованных ВАК, получен 1 патент РФ RU2583756 «Способ определения местоположения на основе сигнатур изображений городской застройки в видимом и инфракрасном диапазонах», а также 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611707 «Программа имитационного моделирования работы системы позиционирования в городской местности на основе видеоданных об окружающей обстановке».

Структура работы. Работа содержит три главы, введение, заключение, список литературы из 124 наименований, список сокращений и обозначений и приложения. Общий объем работы составляет 198 страниц, в том числе 117 страниц основного текста, 67 рисунков и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе предлагается использование в целях видеопозиционирования сигнатур контура рельефа местности (СКРМ), представляющих векторы отсчетов $\bar{A} = \{A(1), A(2), \dots, A(n), \dots, A(N)\}$, здесь N – количество столбцов ТИ, $A(n)$ – номер строки, содержащей контур в n -м столбце. При этом описываются факторы, осложняющие выделение СКРМ: наличие на ТИ мешающих объектов (МО), не представленных на ЦК: деревья, столбы, провода; неоднородность текстуры и цвета фона (неба), а также объектов застройки; действие мешающих факторов атмосферного характера (МФАХ): дождь, снег, туман.

Таким образом, обосновывается необходимость использования сигнатур неинформативных направлений (СНН), имеющих вид вектора $\bar{X} = \{X(1), X(2), \dots, X(n), \dots, X(N)\}$, где отсчет $X(n) = 1$ для неинформативных направлений и $X(n) = 0$ в противном случае.

Обоснована упрощенная структура (рисунок 1) алгоритма выделения контуров рельефа местности (АВКРМ), включающая:

- выделение на ТИ I областей интереса (ОИ), представляющих участки, содержащие границу фона и зданий ($i_1^F, \dots, i_Q^F$, в то время как Q – количество ОИ), с последующим формированием предварительной сигнатуры неинформативных направлений $\bar{X}_0$, детектирующий столбцы, в которых не обнаружены сегменты, содержащие контур;
- определение элементов СКРМ $a_1, \dots, a_Q$ и соответственно СНН $x_1, \dots, x_Q$ на выделенных ОИ;
- формирование СКРМ A на основе элементов $a_1, \dots, a_Q$ и СНН X на основе $x_1, \dots, x_Q$, а также предварительной сигнатуры неинформативных направлений $\bar{X}_0$.

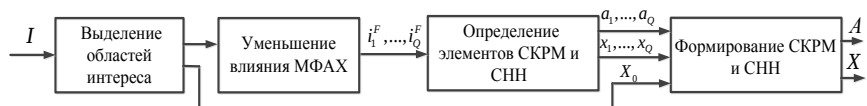


Рисунок 1 – Упрощенная структура алгоритма выделения контуров рельефа городской местности на телевизионных изображениях

Выделение областей интереса должно включать разделение ТИ на участки, близкие по некоторым свойствам (сегментацию), с последующей классификацией, в ходе которой определяются сегменты, содержащие границы объектов городской местности (зданий) и фона.

Кроме выделения СКРМ и СНН при обработке видеоданных в целях позиционирования МРА требуется использовать все возможности для уменьшения зоны неопределенности. При этом уменьшение зоны неопределенности видеопозиционирования обеспечит сокращение вычислительных затрат при определении местоположения МРА на основе выделенных СКРМ, а также повышение однозначности определения координат. Предлагается использовать распознавание характерных объектов местности (ХОМ) на ТИ окружающей обстановки для данной цели.

Экспериментальные исследования, проведенные в данной главе, производились на основе выборки, включающей 215 изображений участков городской местности с различным видом застройки, полученных в разное время года при изменяющихся погодных условиях.

Предложен эвристический алгоритм, включающий выделение особых точек при помощи детектора Харриса с последующим разделением данных точек на группы методом К-средних и дальнейшим выделением прямоугольных областей ТИ (сегментов), соответствующих полученным группам. На основе экспериментальных исследований принято целесообразным число сегментов на одном изображении $K=32$, причем рассматривались изображе-

ния с разрешением $M \times N = 240 \times 320$ пикселей, полученные с использованием ВК с углом обзора по азимуту $\Phi \approx 60^\circ$.

Предложен алгоритм классификации полученных сегментов с целью выделения ОИ на основе набора признаков, сформированных при использовании ряда эвристических утверждений. При этом предлагается использовать искусственную нейронную сеть (ИНС) прямого распространения, обучаемую с применением тестовой выборки методом обратного распространения ошибки. Проведены исследования различных структур ИНС и стратегий обучения, в результате которых рекомендуемым устройством классификации сегментов явилась трехслойная сеть, содержащая во входном, скрытом и выходном слоях соответственно $n_p = 5$, $n_y = 4$, $n_n = 5$ нейронов, для обучения которой на вход в первую очередь подавались наиболее «чистые» представители классов из выборки. Значение вероятности правильной классификации, полученное при использовании тестовой выборки объемом 3200 сегментов, выделенных из 200 изображений, составило 0,84.

Исследован алгоритм формирования элементов СКРМ на выделенных ОИ, включавший бинаризацию с целью выделения пикселей фона и устранение влияния мелких мешающих объектов как темных областей с малыми угловыми размерами. Предложен алгоритм бинаризации областей интереса, основанный на априорной информации о расположении пикселей фона преимущественно в верхней части сегмента, описываемый формулой:

$$\begin{cases} i_k^b(u, v) = 1 \text{ при } H_d(i_k^c(u, v)) \geq \Pi_I, & i_k^b(u, v) = 0 \text{ при } H_d(i_k^c(u, v)) < \Pi_I, \\ H_d = 2 \cdot H_{IT} - H_I; \end{cases} \quad (1)$$

при этом H_I – гистограмма яркости сегмента, H_d – разностная гистограмма яркости, H_{IT} – гистограмма верхней половины сегмента, Π_I – порог, определяемый опытным путем. Для определения рекомендуемого значения порога Π_I проведены экспериментальные исследования зависимостей доли неверно определенных пикселей фона от данной величины, полученных на основе выборки содержащей 380 сегментов. Показано, что наилучшее (с точки зрения минимума ошибки детектирования фона) значение порога Π_I лежит в пределах 0,0021...0,0023.

Рассмотрен алгоритм устранения мелких мешающих объектов на основе морфологических операций раскрытия и закрытия, определены наилучшие размеры ядер для данных операций. Вместе с тем проведены экспериментальные исследования эффективности применения медианной фильтрации к ОИ при уменьшении влияния МФАХ. Выбраны наилучшие с точки зрения уменьшения ошибки выделения элементов СКРМ на областях интереса размеры ядер, соответствующие дождю и снегу.

Также предложен алгоритм выделения ХОМ в виде промышленных дымовых труб (ПДТ) на ТИ городской обстановки в целях уменьшения зоны неопределенности при видеопозиционировании обеспечивающий значение вероятности правильного обнаружения снимка, содержащего изображение ПДТ, достигающее 85 % и величину вероятности ошибки второго рода – 5 %.

На основе вышеизложенного обоснована структурная схема АВКРМ, которая приведена на рисунке 2.

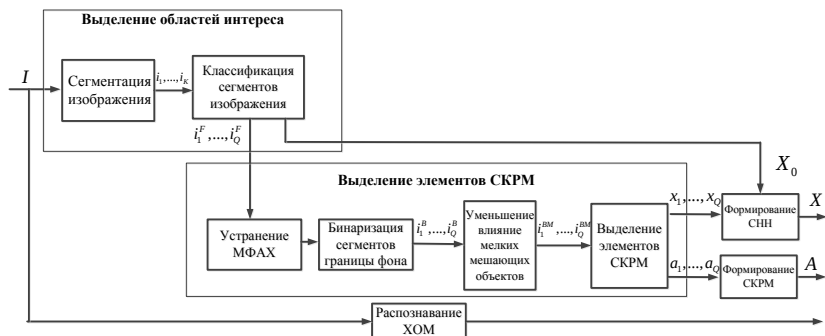


Рисунок 2 – Структурная схема алгоритма выделения контуров рельефа местности на телевизионных изображениях

Проведены экспериментальные исследования эффективности применения предложенного АВКРМ при использовании выборки, включавшей 215 изображений. При этом представлены критерии, по которым оценивалась эффективность АВКРМ, основными из которых являются доля неинформативных направлений и угловая ошибка выделения сигнатур:

$$S_x = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N X(n), \quad D_s = \frac{60^\circ}{N} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N |(1 - X^X(n)) \cdot A^X(n) - (1 - X(n)) \cdot A(n)|, \quad (2)$$

где $A^X(n)$ и $X^X(n)$ – СКРМ и СНН, которые соответствуют идеальной работе АВКРМ, для имитации которых применялись сигнатуры, полученные из ТИ тестовой выборки при использовании графического редактора. Установлено, что величина угловой D_s ошибки выделения СКРМ лежит в пределах 0,5 до 2,3 градуса, причем доля неинформативных направлений S_x находилась в пределах от 0,03 до 0,27 (в обоих случаях доверительная вероятность составляла 0,95).

Во второй главе рассмотрены алгоритмы видеопозиционирования МРА на основе контуров рельефа городской местности. Обоснована структурная схема способа видеопозиционирования, соответствующая способу видеопозиционирования на основе сигнатур ТИ городской местности, представленная на рисунке 3.



Рисунок 3 – Структурная схема способа видеопозиционирования объектов в городской местности на основе ЦК

Исходными данными для СВП являются изображения, полученные из блока бортовых ВК МРА, и информация об угловой ориентации видеосистемы (показание датчиков ориентации: компаса, инклинометра, инерциального модуля). Выделение информации о контурах рельефа застройки (СКРМ и СНН), а также распознавание ХОМ производилось с помощью АВКРМ при использовании алгоритмов, представленных в предыдущей главе. Затем информация об обнаруженных ХОМ используется для формирования зоны неопределенности D из общей территории позиционирования D_0 .

При оценке координат МРА применялось построение эталонных сигнатур (ЭС) контуров рельефа застройки для различных значений координат (x, y) из области неопределенности D при использовании ЦК городской местности и данных о направлении объектива на основе перспективной модели сцены. При этом видеопозиционирование МРА заключалось в определении координат (x_p, y_p) , соответствующих глобальному минимуму целевой функции (ЦФ), имеющей смысл меры различия между выделенными СКРМ и эталонными ЭС, с учетом неинформативных направлений. Обоснованы основные параметры оценки эффективности СВП – точность видеопозиционирования и площадь однозначного видеопозиционирования, определяемая как площадь зоны неопределенности, на которой вероятность ложного видеопозиционирования не превышает заданный предел.

Представлен алгоритм видеопозиционирования на основе контуров рельефа городской местности и ЦК при наличии информации об ориентации МРА относительно горизонтальной плоскости. Принята ЦФ, имеющая вид среднего модуля разности СКРМ и ЭС с учетом СНН:

$$\begin{cases} f(x, y) = \frac{360^\circ}{6 \cdot N} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^{6 \cdot N} \left| \left(A^O(n) - B(x, y, 360^\circ, n - \gamma_1) \right) \cdot (1 - X^O(n)) \right|; \\ \gamma_1 = \arg \max(R(\gamma)); R(\gamma) = \sum_{n=1}^{6 \cdot N} \left(A^O(n) \cdot B(x, y, 360^\circ, n - \gamma) \cdot (1 - X^O(n)) \right), \end{cases} \quad (3)$$

где $R(\gamma)$ – взаимно корреляционной функция (ВКФ), γ_1 – аргумент максимума ВКФ [величина сдвига, определяемая как значение аргумента, в котором достигается максимум $R(\gamma)$], между круговой СКРМ $A^o(n)$ и ЭС $B(x, y, 360^\circ, n - n_1)$ с учетом круговой СНН $X^o(n)$, построенной для данной точки для значения ширины обзора 360° и нулевого азимута. Круговые сигнатуры $A^o(n)$ и $X^o(n)$ представляют объединение сигнатур полученных из различных ВК, пересчитанных с учетом данных об ориентации МРА относительно горизонтальной плоскости (угла возвышения θ и крена ψ).

На основе свойств ЦФ и характеристик АВКРМ путем численного эксперимента определены параметры эффективности СВП. Получены зависимости достижимого значения площади однозначного видеопозиционирования S_l от угловой ошибки выделения сигнатур D_s при доле неинформативных направлений $S_x = 0,3$ для различных значениях разрешения используемых сигнатур. Показано, что достижимое значение площади однозначного видеопозиционирования в случае использования АВКРМ описанного в первой главе (то есть при $D_s = 2,3^\circ$) составило величину свыше 100 кв. км (для разрешения $N > 80$ пикселей на 60°).

Определение глобального минимума ЦФ затруднено наличием множества побочных локальных минимумов (ПЛМ), структура которых определяется формой рельефа местности. Представлен двухэтапный алгоритм определения глобального минимума (ГМ) ЦФ, содержащий:

этап 1, в котором осуществляется вычисление функции в узлах равномерной сетки Λ , покрывающей всю зону неопределенности D с шагом Δ_r , с получением координат узла сетки x_1, y_1 , соответствующего минимальному из полученных значений;

этап 2, в котором осуществляется минимизация квадрата ЦФ в окрестности данной точки методом градиентного спуска с дроблением шага.

Выбор шага Δ_r производился на основе исследования зависимостей площади однозначного видеопозиционирования от данной величины для различных значений разрешения используемых сигнатур при доле неинформативных направлений $S_x = 0,25$ и угловой ошибке выделения сигнатур $D_s = 2,3^\circ$. Установлено, что при требовании обеспечения площади однозначного позиционирования $S_l = 100$ кв. км целесообразно использовать на этапе 1 шаг поиска $\Delta_r = 12$ м и разрешение $N = 80$.

В целях устранения эффектов, усложняющих использование градиентных методов оптимизации и связанных с негладкостью в точке, соответствующей глобальному минимуму, характерной для ЦФ в виде среднего модуля

разности между СКРМ и ЭС, на втором этапе при локальной минимизации рассматривается функция, представляющая квадрат ЦФ. При этом в целях повышения достижимой точности позиционирования на этапе 2 возможно увеличение разрешения используемых сигнатур, которое не приведет к значительному росту вычислительных затрат ввиду малого количества шагов вычисления ЦФ на этапе 2 по сравнению с этапом 1, определяющим основной объем требуемых действий.

Преимущество данного алгоритма заключалось в том, что при реализации первого этапа можно заранее сформировать и поместить в память набор эталонов для фиксированной сетки координат, в то время как использование методов, включающих многократную локальную оптимизацию (мультистарт, метод запретов), влечет построение эталонов для множества точек во время определения позиции, что требует гораздо больших вычислительных затрат. Также данный алгоритм обеспечивал возможность использования распараллеливания вычислений при реализации. Однако этот имеет недостаток, заключающийся в большом количестве шагов вычисления ЦФ, что объясняется отсутствием использования информации об её свойствах.

Предложена модификация первого этапа алгоритма определения глобального минимума ЦФ, включающая использование метода локальной оптимизации с фиксированным шагом Δ_r на открытых участках и последовательного поиска на всех остальных. Данная модификация основана на использовании априорной информации, заключенной в том, что вид интервалов непрерывности ЦФ, на каждом из которых существует ПЛМ, определяется формой рельефа местности. При этом интервалам непрерывности ЦФ соответствуют зоны городской местности, ограниченные объектами застройки, то есть на участках плотной застройкой встречаются относительно узкие ПЛМ, а на открытых участках местности (на городских окраинах) – широкие.

Проведены экспериментальные исследования точности определения координат ГМ при рассмотрении $N_y = 13$ участков городской местности с различными типами застройки общей площадью 10,4 кв. км, причем рассматривались $N_{II} = 130$ различных позиций МРА. В результате получены зависимости СКО ошибки позиционирования σ_d от угловой ошибки выделения сигнатур D_s при доле неинформативных направлений $S_x = 0,25$ для различных значений разрешения, представленные на рисунке 4.

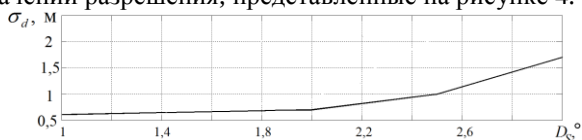


Рисунок 4 – Зависимости СКО ошибки видеопозиционирования от угловой ошибки выделения сигнатур

Анализ данных зависимостей позволяет сделать вывод, что значение СКО ошибки видеопозиционирования при $N = 320$ и угловой ошибке позиционирования $D_s = 2,3^\circ$ равно $\sigma_r = 0.81$ м, в то время как сокращение шагов вычисления ЦФ (то есть вычислительных затрат на первом этапе) составило величину от 12...41 % для различных участков местности за счет использования априорной информации о свойствах ЦФ.

Также представлен алгоритм видеопозиционирования на основе контуров рельефа городской местности и ЦК с использованием информации о характеристиках движения МРА. Исходными данными для алгоритма являются информация о контурах рельефа местности (СКРМ и СНН), полученная на основе ТИ, снятых в определенные моменты движения МРА в некоторых точках зоны неопределенности (точках съемки); оценки приращений координат и ориентации МРА в точках съемки (ТС), которые могут быть получены с помощью инерциальной системы навигации. Для рассматриваемого алгоритма видеопозиционирования использовалась ЦФ следующего вида:

$$f(x, y) = \frac{360^\circ}{(6 \cdot N)^2 \cdot N_p} \times \sum_{n_p=0}^{N_p-1} \sum_{n=1}^N \left| \left(A^o(n) - \left(B(x + \delta x(n_p), y + \delta y(n_p), 360^\circ, \tilde{\varphi}(n_p), \tilde{\theta}(n_p), \tilde{\psi}(n_p), n) \right) \cdot (1 - X^o(n)) \right) \right|; \quad (4)$$

где N_p – количество ТС, $\tilde{\varphi}(n_p)$, $\tilde{\theta}(n_p)$, $\tilde{\psi}(n_p)$ – оценка азимута и угла возвышения и крена ВК в n_p -й ТС при получении изображений соответственно, $\delta x(n_p)$, $\delta y(n_p)$ – оценки приращений координат между n_p -й и $(n_p - 1)$ -й ТС ($\delta x(1) = 0$, $\delta y(1) = 0$).

В результате экспериментальных исследований установлено, что для СВП, использующей ТИ из 2-х ТС при использовании АВКРМ, предложенного в предыдущей главе, обеспечивающей значения средней угловой ошибки $D_s = 2,3^\circ$ и доли неинформативных направлений $S_x = 0,25$, достижимая площадь однозначного позиционирования составит величину свыше $S_l = 600$ кв. км. То есть использование дополнительной информации о движении МРА позволит при фиксированных характеристиках АВКРМ увеличить площадь однозначного позиционирования более чем в 6 раз или при фиксированном значении S_l снизить чувствительность СВП к погрешности АВКРМ (угловой ошибке выделения контура) до двух раз.

Также представлен алгоритм видеоориентации МРА по азимуту на основе контуров рельефа городской местности и ЦК при известных координатах, использующий определение максимума взаимнокорреляционной функции между СКРМ и эталонной сигнатурой с учетом СНН. Экспериментальные исследования точности алгоритма видеоориентации производились путем имитационного моделирования с использованием модели сигнатур из

$N_{II} = 300$ точек области участков городской местности, общей площадью $S = 20$ кв. км. Установлено, что при использовании представленного АВКРМ ($D_s = 2,3^\circ$ и $S_x = 0,25$), обеспечивается СКО ошибки ориентации МРА по азимуту в пределах $\sigma_\varphi < 1,5^\circ$ при СКО ошибки позиционирования на входе в пределах $\sigma_r < 5$ м.

Вместе с тем проведено исследование эффективности уменьшения зоны неопределенности при использовании ХОМ, в качестве которых рассматривались ПДТ. При значениях вероятности правильного обнаружения, приведенных в предыдущей главе, средняя величина уменьшения зоны неопределенности составит не менее 18,5 %.

В третьей главе рассмотрена практическая реализация алгоритмов видеопозиционирования на современной элементной базе. Рассмотрены меры по сокращению вычислительных затрат на реализацию наиболее объемного этапа работы СВП – поиска минимума ЦФ, предполагающего многократное вычисление циклической свертки СКРМ и ЭС из набора эталонов, хранимого в запоминающем устройстве (ЗУ). Обоснованно использование базиса Фурье в целях вычисления циклической свертки как требующего наименьшее количество вычислительных затрат для реализации сверток требуемой длины, а также наиболее проработанного с практической точки зрения. В этом случае набор эталонов целесообразно хранить в ЗУ в форме Фурье-спектров ЭС, причем открывается возможность уменьшения требуемого объема памяти ввиду того, что основная энергия спектра ЭС сосредоточена вблизи нулевых отсчетов. То есть в ЗУ можно хранить вместо N отсчетов только первые N/K_p (K_p – коэффициент усечения спектра), хотя использование для вычисления ЦФ такой операции приводит к некоторому увеличению ГМ ЦФ и соответственно уменьшению зоны однозначного позиционирования. В результате экспериментальных исследований получены зависимости увеличения ГМ ЦФ от коэффициента усечения спектра и принята величина коэффициента усечения $K_p = 4$, при которой уменьшение площади однозначного позиционирования составит 8-21 %, что является приемлемым значением. Также получены оценки объема памяти, требуемого для хранения базы ЭС, ЦК и исходных изображений, составляющие соответственно 110,2 Мбайт; 762 Мбайт; 1,32 Мбайт.

Исследована отечественная вычислительная элементная база с точки зрения времени выполнения основных операций СВП, цены и наличия дополнительных функциональных возможностей и особенностей. В результате наиболее подходящим вычислительным средством для реализации СВП принята микросхема K1879ВЯ1Я фирмы «Модуль», представляющая цифровой программно-определяемый приемник, включающий процессорную систему

ARM и два процессорных ядра оригинальной архитектуры NeuroMatrix. Разработана структурная схема реализации СВП на базе данной микросхемы, а также получены приближенные оценки времени выполнения этапа поиска минимума ЦФ алгоритма видеопозиционирования, составляющее $T_{\text{л}} = 6,2$ с.

В целях получения объема видеoinформации, необходимого для разработки СВП и оценки точности алгоритмов обработки изображений, устойчивых к изменениям внешних условий и приспособленных к работе в различной обстановке, был разработан экспериментальный макет. Данный макет включал блок из шести аналоговых ВК, многоканальный видеорегистратор для захвата ТИ, переносной персональный компьютер, выполняющий роль вычислителя СВП, а также конструктивные элементы. На участке города Рязани общей площадью 1,7 кв. км проведены экспериментальные исследования точности позиционирования МРА в городской местности, в результате которых получены значения СКО ошибки позиционирования, составляющие $\sigma_r = 1,23$ м, что достаточно близко к достижимым значениям ошибок, аналитически полученным в предыдущих пунктах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены исследования в целях разработки способа и алгоритмов обработки телевизионной видеoinформации об окружающей обстановке, обеспечивающих выделение контуров рельефа городской местности при наличии мешающих факторов и мешающих объектов в целях видеопозиционирования МРА.

На основании вышеизложенного можно сформулировать следующие основные результаты:

1. Разработан АВКРМ на ТИ в целях видеопозиционирования МРА, позволяющая обеспечить величину ошибки выделения контуров в пределах 2,3 градуса.

2. Разработан алгоритм выделения характерных объектов (промышленных дымовых труб) на ТИ в целях уменьшения зоны неопределенности при позиционировании, при этом значение вероятности правильного обнаружения снимка, содержащего изображение характерного объекта, составило 85 %, в то время как величина вероятности ошибки второго рода находилась в пределах 5 %.

3. Разработаны алгоритмы видеопозиционирования МРА на основе контуров рельефа местности. При этом для случая использования представленного АВКРМ проведены оценки достижимой площади однозначного видеопозиционирования, составившей величину свыше 100 кв. км, и достижимой величины СКО ошибки определения местоположения МРА, находившейся в пределах $\sigma_d < 0.3$ м (при разрешении $N > 40$ пикселей на 60°). Также обоснован двухэтапный алгоритм определения глобального минимума

ЦФ, обеспечивающий значение СКО ошибки видеопозиционирования в пределах $\sigma_r = 0.81$ м, при условии использования АВКРМ с приведенными выше характеристиками.

4. Проведены исследования возможности технической реализации алгоритмов видеопозиционирования на современной отечественной элементной базе, при этом:

- разработан ряд мер по уменьшению вычислительных затрат, требуемых на реализацию СВП, а также произведена оценка необходимых значений производительности и объема памяти СВП;

- проведен обзор современной отечественной элементной базы, при котором в качестве наиболее подходящего вычислительного средства для реализации СВП выбрана микросхема K1879ВЯ1Я фирмы «Модуль».

5. Разработан макетный образец СВП и проведены экспериментальные исследования точности видеопозиционирования МРА в городской местности, в результате которых получены значения СКО ошибки видеопозиционирования 1,23 м; что достаточно близко к достижимым значениям точности позиционирования, полученным выше при использовании численных методов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рецензируемых ВАК

1. Кириллов С.Н., Бердников В.М., Акопов Э.В. Алгоритм видеопозиционирования объектов в городской местности на основе цифровой карты// Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. № 47. 2014. С. 3-9.
2. Кириллов С.Н., Бердников В.М., Акопов Э.В. Алгоритм обработки видеоинформации в интересах позиционирования объектов в городской местности// Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. № 55. 2016. С. 104-110.
3. Кириллов С.Н., Бердников В.М., Акопов Э.В. Алгоритм распознавания характерных объектов на изображениях урбанизированной местности в интересах уменьшения зоны неопределенности при позиционировании мобильных роботизированных аппаратов// Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. № 56. 2016. С. 107-113.
4. Кириллов С.Н., Бердников В.М., Косткин И.В., Акопов Э.В., Елютин А.В. Комплекс позиционирования роботов на основе систем технического зрения и автономной видео и радионавигации// Радиотехника. №8 2016. С. 18-25.
5. Кириллов С.Н., Бердников В.М., Акопов Э.В. Автономные системы позиционирования для роботизированных комплексов на открытой и урбанизированной местности// Труды XIX Международного форума по про-

блемам науки, техники и образования; под ред. В.В. Вишневого, Москва, 2015, ISBN 978-5-93411-055-1. С 87-89.

Патент на изобретение

6. Кириллов С.Н., Бердников В.М., Акопов Э.В. Способ определения местоположения на основе сигнатур изображений городской застройки в видимом и инфракрасном диапазонах. Патент RU2583756, Дата регистрации: 13.04.2016.

Свидетельство о регистрации программы

7. Кириллов С.Н., Акопов Э.В. Программа имитационного моделирования работы системы позиционирования в городской местности на основе видеоданных об окружающей обстановке, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611707, 9.02.2016.

Прочие публикации

8. Акопов Э.В. Алгоритм распознавания характерных объектов на изображении урбанизированной местности с целью уменьшения зоны неопределенности при позиционировании// Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016: сб. тр. МНТК: в 4 т. Т.1/ под ред. О.В. Миловзорова. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2016. С. 127-130.

9. Бердников В.М. Акопов Э.В. Алгоритм видеоориентации роботизированных аппаратов в урбанизированной местности на основе цифровой карты местности// XX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов НИТ 2015: материалы конференции, Рязань, 2015. С. 121-123.

10. Кириллов С.Н., Бердников В.М., Косткин И.В., Акопов Э.В., Елютин А.В. Видеопозиционирование робототехнических комплексов с использованием системы технического зрения в условиях урбанизированной местности: доклады 18-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2016»: в 2-х т. Т.2. Москва, 2016. С. 843-846.

11. Кириллов С.Н., Бердников В.М., Косткин И.В., Акопов Э.В. Система видеопозиционирования в условиях урбанизированной среды с использованием цифровой карты местности: Доклады 16-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2014», в 2-х т. Т.1. Москва, 2014. С. 503-507.

12. Бердников В.М., Акопов Э.В. Пассивная система видеопозиционирования в урбанизированной местности на основе цифровой карты// XIX ВНТК НИТ 2014: материалы конференции. Рязань, 2014. С. 113-114.

13. Бердников В.М., Акопов Э.В. Математический метод выделения контуров рельефа застройки на изображении: сб. тр. XXVIII Международной научной конференции «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ» ММТТ-28, Т. 7, Рязань, 2015. С. 121-123.

Акопов Эдуард Вячеславович

**СПОСОБ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАТУР
ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГОРОДСКОЙ
МЕСТНОСТИ В ИНТЕРЕСАХ ВИДЕОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
МОБИЛЬНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ АППАРАТОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 27.09.2016
Формат бумаги 60х84 1/16.
Тираж 100 экз. Заказ №444.
Отпечатано в ООО «Печатный дом».
390000, г. Рязань, ул. Горького, 102 б.