

На правах рукописи



КОРЕПАНОВ Семен Евгеньевич

**АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ И ОЦЕНИВАНИЯ ИХ
ТРАЕКТОРНЫХ ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАНАЛОВ
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка
информации (технические системы)»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Научный руководитель: Бабаян Павел Вартанович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «РГРТУ», г. Рязань, зав. кафедрой

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

Муртазов Андрей Константинович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», г. Рязань,
директор астрономической обсерватории

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «ЯрГУ», г. Ярославль

Защита состоится **21.12.2016 г. в 13 часов** на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу:

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, ауд. 235.

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

Автореферат разослан « » ноября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Пржегорлинский В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Бортовые системы обработки информации и управления (БСОИиУ), предназначенные для установки на мобильные носители, такие как самолеты, вертолеты, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), автомобили и т.п., находят все более широкое применение в современном мире.

Одной из актуальных сфер применения БСОИиУ является **относительная навигация** при сближении с объектом, цель которой заключается как в определении **траекторных** параметров объекта, так и в планировании траектории движения мобильного носителя для выполнения маневра на основе полученной информации и специфики задачи. К траекторным параметрам объекта относятся такие параметры, которые позволяют описать перемещение объекта в пространстве относительно мобильного носителя, т.е. его относительные координаты, относительная скорость, ориентация, расстояние до объекта и другие.

Данная диссертационная работа посвящена решению задачи обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров в БСОИиУ, предназначенных для относительной навигации при сближении с объектами. Оцененные траекторные параметры объекта в процессе сближения с ним являются исходными данными для прогнозирования дальнейшего движения объекта и требуются для организации управления движением мобильного носителя, что позволяет решить задачу относительной навигации.

Определение местоположения объекта относительно мобильного носителя обеспечивается с помощью БСОИиУ, установленной на мобильный носитель и включающей в себя подсистему, предназначенную для формирования изображений наблюдаемой сцены (далее – **канал технического зрения (КТЗ)**).

Следует отметить, что существенной особенностью, которую необходимо учитывать при разработке алгоритмов обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ, ориентированных на решение задач относительной навигации при сближении с объектом, является значительное изменение размеров наблюдаемого объекта на изображении. В процессе сближения они изменяются от точечных (1×1 пикселей) до размеров, при которых границы объекта выходят за пределы поля зрения видеодатчиков КТЗ.

На определенном расстоянии до объекта становятся различимы его детали. При дальнейшем сближении с объектом его границы выходят за пределы поля зрения видеодатчиков КТЗ, при этом возникают трудности в оценивании координат и размеров объекта. Для их преодоления требуется найти особые области объекта на изображении, и в дальнейшем оценку его траекторных параметров проводить с использованием данных областей.

Дополнительно к задаче оценивания траекторных параметров объекта может ставиться задача оценивания траекторных параметров конкретного элемента объекта, например, заправочного конуса в случае дозаправки летательных аппаратов (ЛА) в воздухе по методу штанга-конус.

Таким образом, при разработке алгоритмов анализа изображений, полученных с использованием КТЗ БСОИиУ, в общем случае можно выделить следующие задачи: обнаружение малоразмерного объекта и оценивание его траекторных параметров, выделение особых областей объекта и оценивание их параметров, выделение элемента объекта и оценивание его параметров.

Несмотря на значительное число работ, направленных на разработку алгоритмов решения отдельных задач из приведённого списка, на данный момент не предложено универсального подхода для обнаружения и оценивания траекторных параметров объекта на всех этапах сближения с ним.

Исходя из всего вышесказанного, задача разработки алгоритмов обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ является актуальной.

В данной диссертационной работе предлагается решить данную задачу путём разработки **многоэтапных** алгоритмов, сочетающих ряд отдельных алгоритмов (будем называть их **базовыми**). Базовые алгоритмы предназначены для решения задач, возникающих на разных этапах сближения с объектом.

Степень разработанности темы. Вопросам обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ уделяется большое внимание в отечественной и зарубежной литературе. Значительный вклад в разработку методов и алгоритмов обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров внесли работы таких ученых, как Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, В.К. Баклицкий, П.А. Бакут, В.Г. Бондарев, А.М. Бочкарев, Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, В.Г. Лабунец, G. Campa, M.L. Fravolini, W. Pratt.

В ряде работ широко освещены вопросы обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров как при подвижном, так и неподвижном видеодатчике КТЗ. Также существуют работы, в которых решается задача относительной навигации на ограниченном временном участке при сближении с объектом (дозаправка в воздухе летательных аппаратов).

Вместе с тем вопросы обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ, возникающие в задаче относительной навигации при значительном изменении расстояния до объекта (от расстояния, когда размеры изображения объекта являются точечными, до расстояния, когда видеодатчики КТЗ расположены вплотную к объекту), практически не рассматриваются.

Цель и задачи работы. Цель диссертационного исследования состоит в разработке многоэтапных алгоритмов обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ, предназначенных для относительной навигации при сближении с объектами в различных условиях наблюдения.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие основные задачи:

– анализ существующих методов обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров для наземной и воздушной относительной навигации;

- разработка многоэтапного алгоритма обнаружения объекта и оценивания его траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ, предназначенной для относительной навигации летательных аппаратов при дозаправке в воздухе;
- разработка многоэтапного алгоритма обнаружения объекта и оценивания его траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ, предназначенной для относительной наземной навигации;
- синтез алгоритма оценки параметров объекта при наличии близкорасположенных похожих объектов на изображении;
- разработка правил переключения между базовыми алгоритмами в составе многоэтапных алгоритмов обнаружения объекта и оценивания его траекторных параметров;
- экспериментальные исследования эффективности разработанных алгоритмов.

Научная новизна диссертации.

1. Разработаны базовые алгоритмы обнаружения малоразмерного объекта и оценивания его траекторных параметров на фоне звёздного неба, отличающиеся совместным использованием процедур оценивания геометрических преобразований фона и траекторной обработки.

2. Предложены многоэтапные алгоритмы обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ, предназначенных для относительной навигации при дозаправке в воздухе и для относительной наземной навигации. Отличительной особенностью предложенных многоэтапных алгоритмов является наличие процедур переключения между базовыми алгоритмами, основанных на оценках траекторных параметров объектов и критериях работоспособности.

3. Предложен критерий работоспособности многоэтапного алгоритма определения параметров геометрических преобразований изображений, отличающийся тем, что выполняется оценка отношения сигнал/шум для опорных участков с последующим объединением полученных оценок в единый критерий.

4. Предложен модифицированный разностный корреляционный алгоритм оценивания параметров объектов, отличающийся введением штрафной функции экспоненциального вида и позволяющий повысить точность оценивания параметров объектов при наличии близкорасположенных объектов на изображении и низких отношениях сигнал/шум.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования в настоящей работе выполнены на основе методов математической статистики, теории вероятностей, теории цифровой обработки сигналов и изображений.

Моделирование и экспериментальные исследования предлагаемых алгоритмов выполнялись на полунатурных и синтезированных видеосюжетах. Синтез видеосюжетов производился с применением программных средств 3D-визуального имитационного моделирования сцен.

Реализация и внедрение. Разработанные в диссертации алгоритмы были использованы при выполнении научно-исследовательских работ, проводимых в Рязанском государственном радиотехническом университете по заказу

Министерства образования и науки РФ, Федерального агентства по образованию (НИР 17-08Г, НИР 12-09Г, НИР 23-09, НИР 9-10Г, НИР 42-10, НИР 19-14Г) и АО «Государственный Рязанский приборный завод» (НИР 1-08, НИР 3-09, НИР 35-10, НИР 17-12). Полученные результаты диссертационного исследования были также использованы в опытно-конструкторских работах «Нивелир-СОС», «Нивелир-КТА-СОС», проводимых АО «Государственный Рязанский приборный завод».

Теоретическая и практическая значимости работы:

- рассмотрена и решена задача обнаружения и оценивания траекторных параметров объекта при существенном изменении размеров объекта в процессе сближения;

- на основе введенных математических моделей разработаны многоэтапные алгоритмы обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров с использованием каналов технического зрения бортовых систем обработки информации и управления, предназначенных для относительной навигации при сближении с объектами;

- синтезирован алгоритм оценки параметров объекта при наличии близкорасположенных похожих объектов на изображении;

- результаты диссертационной работы использованы в НИР и ОКР, что подтверждается актами внедрения.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: 5-й международной научно-технической конференции «К.Э.Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика.» (Рязань – 2007); 6-й всероссийской научно-технической конференции «Искусственный интеллект в XXI веке» (Пенза, 2008); 13-й, 14-й, 16-й и 20-й всероссийских научно-технических конференциях «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании» (Рязань – 2008, 2009, 2011, 2015); международной научно-технической конференции «Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы» (Таганрог – 2009); 8-ой международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва – 2009); 10-й и 18-й международных научно-технических конференциях «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва – 2008, Москва – 2016); 15-й, 16-й и 18-й международных научно-технических конференциях «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань – 2008, 2010, 2015); научно-технических конференциях «Техническое зрение в системах управления - 2012» и «Техническое зрение в системах управления - 2016» (Москва – 2012, 2016); международной конференции «SPIE Remote Sensing» (Амстердам – 2014).

Достоверность результатов и выводов диссертации подтверждается корректным использованием математического аппарата, результатами имитационного моделирования на ЭВМ и экспериментальными исследованиями.

По теме диссертации опубликовано 22 работы, в том числе 5 статей в журналах, рекомендуемых ВАК для публикации результатов кандидатских

диссертаций. Результаты исследований отражены в 10 отчётах о НИР, прошедших государственную регистрацию.

Положения, выносимые на защиту:

- предложенный многоэтапный алгоритм обнаружения объекта и оценивания его траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ, предназначенной для относительной навигации летательных аппаратов при дозаправке в воздухе, позволяет обнаруживать объект приблизительно за 30-35 кадров и оценивать его координаты с частотой правильной локализации на фоне звёздного неба в 2,8 раза большей, а на фоне неба в дневное время в 4,4 раза большей по сравнению с базовыми алгоритмами;

- разработанный многоэтапный алгоритм обнаружения объекта и оценивания его траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ, предназначенной для относительной наземной навигации, позволяет обнаруживать объект и оценивать его координаты с частотой правильной локализации на неоднородном фоне в 2,1 раз большей по сравнению с базовым алгоритмом;

- предложенный модифицированный разностный корреляционный алгоритм оценки параметров объекта при наличии близкорасположенных похожих объектов на изображении обеспечивает требуемую точность оценивания параметров объекта при значении отношения сигнал/шум в 2 раза меньшем, чем для разностного корреляционного алгоритма;

- разработанный критерий работоспособности разностного корреляционного алгоритма обеспечивает уменьшение частоты ошибок второго рода по сравнению с известными критериями от 2 до 12 раз при сопоставимой частоте ошибок первого рода.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (156 источников), изложенных на 238 страницах, содержит 60 рисунков, 3 таблицы и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации изложены актуальность избранной темы, степень её разработанности, цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы диссертационного исследования, личный вклад, положения, выносимые на защиту, степень достоверности, апробация результатов, описание структуры и объёма диссертации.

Первая глава диссертации посвящена анализу проблем обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ, предназначенных для относительной навигации:

- при сближении воздушного мобильного носителя с объектом на однородном фоне неба днём и ночью (ночью – на фоне звёздного неба) на примере автоматической дозаправки пилотируемых и беспилотных ЛА в воздухе по методу штанга-конус;

- при сближении наземного мобильного носителя с наземным объектом на неоднородном фоне. Такая ситуация возникает, например, в задаче

статистического анализа траекторных параметров движущихся автомобилей на выбранном участке дороги.

Работа БСОИиУ начинается с расстояния, на котором объект может быть различим на изображениях, формируемых видеодатчиками КТЗ, и заканчивается на расстоянии, определяемом спецификой задачи (дозаправка в воздухе завершается стыковкой заправочной штанги и конуса).

При разработке алгоритмов обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров в процессе сближения требуется решить четыре задачи. Первая из них заключается в обнаружении малоразмерного объекта на неоднородном и однородном фоне, в том числе на фоне звездного неба, вторая задача – в оценивании траекторных параметров объекта при сближении с ним, в процессе которого границы объекта выходят за пределы поля зрения видеодатчика. Третья и четвертая задачи заключаются в поиске заправочного конуса и оценивании его траекторных параметров. Решения последних необходимы для обеспечения дозаправки ЛА в воздухе.

На основе обзора методов обнаружения объектов и оценивания их параметров (рассматриваются методы на основе корреляционного совмещения с эталоном, статистической сегментации, пространственной фильтрации, пространственно-временной фильтрации, выделения структурных элементов на изображении), а также обзора подходов к решению задач дозаправки в воздухе и автоматической посадки делается вывод о невозможности решения перечисленных задач с помощью универсального алгоритма, построенного на одном из методов обработки изображений.

Для их решения предлагается разработать многоэтапные алгоритмы. Они должны включать наиболее эффективные базовые алгоритмы обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров, которые предназначены для работы с малоразмерными или протяженными объектами на однородном или неоднородном фоне. Переключение между базовыми алгоритмами должно осуществляться в соответствии с правилами переключения, которые также требуется разработать. Решение задач поиска заправочного конуса и вычисления расстояния до объекта предлагается обеспечить с помощью отдельных алгоритмов.

На основе обзора подходов к решению задачи измерения расстояния до объекта обоснован состав КТЗ, который должен включать стереосистему видеодатчиков видимого спектрального диапазона.

Вторая глава посвящена разработке базовых алгоритмов обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров.

Для вычисления расстояния до объекта используются оба видеодатчика стереосистемы, а в качестве исходных данных для обнаружения объекта и оценивания его положения используется видеoinформация, формируемая левым видеодатчиком КТЗ.

В качестве модели, описывающей наблюдаемое изображение, используется модель заслона. Данная модель описывает ситуацию, когда объект закрывает участок фона, расположенный за ним. При этом изображение фона может

подвергаться евклидовым преобразованиям, а изображение объекта – сдвигу, повороту и изменению масштаба.

Для определения взаимного положения объекта и мобильного носителя в процессе сближения вводится измерительная система координат, связанная с центром стереосистемы, а для определения координат объекта на изображении, формируемом левым видеодатчиком КТЗ, – система координат левого изображения. Для пересчёта координат между данными системами получены соответствующие формулы.

Были разработаны базовые алгоритмы обнаружения малоразмерного объекта (АО), оценивания траекторных параметров малоразмерного объекта (АМ) и протяжённого объекта (АП), а также алгоритмы поиска заправочного конуса (АПК), оценивания его параметров (АК) и вычисления расстояния до объекта (АР).

АО на фоне звёздного неба отличается совместным использованием процедур оценивания геометрических преобразования фона и траекторной обработки.

Для вычисления сдвига фона между соседними кадрами $\Delta X(n, n-1)$ производится сопоставление каждому сегменту $s = \overline{1, s_{\max}}$, полученному на n -м кадре, таких сегментов $t = \overline{1, t_{\max}}$, полученных на $(n-1)$ -м кадре, чтобы смещения между координатами этих сегментов не превышали максимально допустимого сдвига фона за кадр. Подсчитывается количество полученных пар смещений. Та пара смещений, которая наиболее часто встречается, определяет предварительную оценку сдвига фона $\Delta \hat{v}(n, n-1)$.

Далее производится установка соответствия между списками сегментов на текущем и предыдущем кадрах $U(n-1)$ и $U(n)$ по полученной предварительной оценке сдвига фона. Для этого для каждого t -го элемента из списка $\hat{U}(n)$, смещенного на $\Delta \hat{v}(n, n-1)$, производится поиск s -го элемента из списка $U(n)$, удаленного на расстояние, не превосходящее p_{Δ} . В результате составляются новые списки сегментов $\hat{U}(n-1)$ и $\hat{U}(n)$, соответствие между элементами которых определяется по номеру в списке.

Затем для каждой пары соответствующих элементов $\hat{U}(n-1)$ и $\hat{U}(n)$ записываются уравнения в соответствии с заданной моделью преобразования фона и находится её псевдорешение. Далее определяется вектор невязки системы, и для всех пар сегментов, для которых значение невязки меньше заданной величины, составляется новая система уравнений. Из псевдорешения данной системы находятся окончательные оценки параметров сдвига и поворота фона.

Для выделения сегментов в АО на фоне звёздного неба используется пороговая обработка. Пороговое значение выбирается на основе известного количества пикселей на изображении, приходящихся на звёзды и объект, при известных размерах изображения.

Анализ поведения выделенных сегментов во времени проводится с использованием алгоритма траекторной обработки, основанного на теории графов и калмановской фильтрации. При этом для сокращения списка сегментов вводятся дополнительные процедуры: удаление малоразмерных объектов и упрощенная морфологическая обработка. Под последней понимается последовательное применение морфологических операций закрытия и открытия к списку сегментов. Обнаружение объекта происходит по его размеру или по величине отличия скорости перемещения относительно других сегментов.

АМ на фоне звёздного неба отличается от рассмотренного АО только этапом обнаружения. В АМ поиск объекта производится по идентификатору, который присваивается в процессе траекторной обработки.

Базовые **АО и АМ на фоне неба в дневное время и на неоднородном фоне** отличаются от АО и АМ на фоне звёздного неба процедурами выделения объекта на изображении, основанными на методах пространственной и пространственно-временной фильтрации.

Также для работы АО на неоднородном фоне требуется предварительно оценивать параметры геометрических преобразований фонового изображения. Эта задача решается с помощью **многоэталонного** алгоритма, разработанного на основе методов корреляционного совмещения с эталоном и выделения структурных элементов на изображении. В его основе лежит принцип, построенный на выборе на изображении нескольких опорных участков и определении их положения от кадра к кадру. Сопоставление участков осуществляется с помощью корреляционного алгоритма с разностной корреляционной функцией.

Работа базового **АП на фоне звёздного неба** происходит следующим образом. Вначале производится пороговая обработка наблюдаемого изображения. Выбор порога осуществляется на основе подхода, основанного на задании одностороннего доверительного интервала. Далее выполняется разметка и параметризация бинарного изображения. Затем удаление малоразмерных сегментов и упрощенная морфологическая обработка, размер структурирующего элемента в которой изменяется в зависимости от размеров объекта. В качестве объекта выбирается сегмент с наибольшими размерами. На следующем кадре процесс повторяется.

В качестве базовых **АП на фоне неба в дневное время и на неоднородном фоне** используется многоэталонный алгоритм. Данный алгоритм оценивает параметры преобразований бинарной маски объекта, полученной от АМ. В качестве альтернативного алгоритма используется **одноэталонный** алгоритм, который основан на выборе одного опорного участка. Оценка его местоположения обеспечивается корреляционным алгоритмом, основанным на минимизации критериальной функции трех аргументов (сдвиг и масштаб).

Оценивание параметров заправочного конуса производится многоэталонным (**АК1**), либо одноэталонным (**АК2**) алгоритмами. В АК1 для повышения точности оценивания параметров конуса вместо разностного

корреляционного алгоритма для сопоставления опорных участков используется модифицированный разностный корреляционный алгоритм оценки параметров объекта при наличии близкорасположенных похожих объектов на изображении.

Синтез модифицированного алгоритма проводился на основе модели прямолинейного движения объекта и модели наблюдения с нулевым фоном. Задача оптимального измерения координат объекта с учетом априорного распределения координат и заданной модели измерения решена по критерию максимума апостериорной плотности вероятности. Для оценивания параметров объекта используется аппарат Калмановской фильтрации.

Использование разработанного алгоритма затруднено тем, что для его применения требуется априорное знание ковариационной матрицы формирующего шума и дисперсии аддитивного шума. Кроме того, используемая модель наблюдаемого изображения предполагает, что фон является нулевым, что выполняется далеко не всегда.

Для преодоления указанных трудностей предложен эвристический алгоритм, критериальная функция которого имеет вид:

$$q(\theta_x, \theta_y) = F_{uu}(\theta_x, \theta_y) \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} |l(x, y) - h(x - \theta_x, y - \theta_y)|, \quad (1)$$

где $F_{uu}(\theta_x, \theta_y) = \left(\sqrt{(\theta_x - \bar{\theta}_x)^2 + (\theta_y - \bar{\theta}_y)^2} + 1 \right)^\gamma$ – штрафная функция, γ – параметр, характеризующий степень доверия к прогнозируемым координатам, θ_x, θ_y – координаты центра объекта, $\bar{\theta}_x, \bar{\theta}_y$ – прогнозируемые координаты объекта, $l(i, j)$ – изображение, $h(i, j)$ – эталонное изображение.

Алгоритм вычисления расстояния до объекта (**АР**) основан на вычислении стереоскопической диспарантности для найденного объекта по изображениям, формируемым видеодатчиками КТЗ. Измерение данной величины проводится с использованием корреляционного подхода. Для субпиксельного уточнения найденного значения диспарантности используется билинейная интерполяция разностной критериальной функции в ближайшей окрестности точки минимума.

Поиск заправочного конуса на изображении производится с использованием разностного корреляционного алгоритма по контурному изображению, полученному с помощью метода Кэнни (**АПК**). Эталонные изображения конуса формируются с учетом диапазона расстояний, на котором требуется обнаружить конус.

Третья глава посвящена разработке многоэтапных алгоритмов обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ, предназначенных как для относительной навигации при дозаправке в воздухе (МА1), так и для относительной наземной навигации (МА2). Отличительной особенностью предложенных многоэтапных алгоритмов МА1 и МА2 является наличие процедур переключения между

базовыми алгоритмами, основанных на оценках траекторных параметров объектов и критериях работоспособности.

Для наглядного отображения возможных переключений между базовыми алгоритмами в процессе работы МА1 на рисунке 1 представлена диаграмма его состояний.

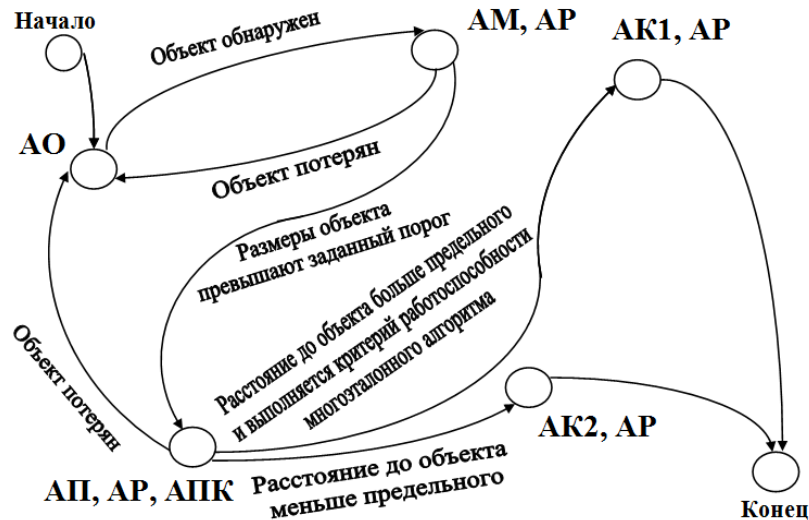


Рисунок 1 – Диаграмма состояний МА1

Диаграмма состояний МА2 отличается базовыми алгоритмами (используются только АО, АМ и АП на неоднородном фоне и АР), а также особенностью перехода от АП к АМ при отдалении объекта.

Для переключения между базовыми алгоритмами были разработаны следующие правила:

1. Переключение с АО на АМ выполняется по факту обнаружения объекта.
2. Переключение с АМ на АО осуществляется при потере объекта (в АМ на данном кадре отсутствует идентификатор объекта).
3. Переключение с АМ на АП на фоне звёздного неба осуществляется при превышении размерами объекта пороговых величин, при которых объект остаётся единственным в процессе работы АМ.
4. Переключение с АМ на АП на фоне неба в дневное время или неоднородном фоне выполняется при превышении размерами объекта пороговых величин, при которых на объекте возможно выбрать заданное количество опорных участков определённого размера.
5. Переключение с АП на АО на фоне звёздного неба осуществляется в момент потери объекта АП, т.е. когда в течение нескольких кадров размеры объекта становятся меньше минимальных допустимых размеров протяжённого объекта, сформированных в процессе перехода с АМ на АП.
6. Переключение с АП на АО на фоне неба в дневное время происходит в момент потери объекта, т.е. когда оцениваемые значения масштаба бинарной маски объекта алгоритмом АП в течение нескольких кадров не превышают единицы.
7. Переключение с АП на АМ на неоднородном фоне обеспечивается в такой момент, когда оцениваемые значения масштаба бинарной маски объекта алгоритмом АП в течение нескольких кадров не превышают единицы.

8. Переключение с АП на многоэталонный алгоритм оценивания параметров конуса (АК1) на фоне неба осуществляется, если:

- успешно выполнена проверка условия перехода на АК1 по расстоянию (измеренное расстояние до объекта с учётом длины заправочного шланга находится в диапазоне $[D_{\max}, D_{\min})$). Далее производится поиск конуса базовым алгоритмом (АПК) и выбор на нём опорных участков;

- успешно выполнена проверка критерия работоспособности многоэталонного алгоритма.

9. Переключение с АП на одноэталонный алгоритм оценивания параметров конуса (АК2) на фоне неба происходит, если измеренное расстояние до конуса достигает критического $D_{\min}$, и условие перехода на АК1 не выполняется.

Оценка работоспособности многоэталонного алгоритма сводится к проверке критериев работоспособности разностного корреляционного алгоритма на выбранных опорных участках. Если количество опорных участков, на которых разностный корреляционный алгоритм работоспособен, не меньше минимального количества опорных участков, достаточных для работы многоэталонного алгоритма, то многоэталонный алгоритм работоспособен, в противном случае – нет.

Критерий работоспособности разностного корреляционного алгоритма

$K_{p.a.} = \frac{L_Z}{\sigma_\xi}$ рассматривается как оценка отношения сигнал/шум в зоне поиска.

В качестве сигнала рассматривается величина, вычисляемая в ходе работы многоэталонного алгоритма, на основе которой осуществляется выбор опорных

участков $L_Z = \left(1 / \sum_{(x,y) \in Z_p} (\Delta_x Z_{p,\phi}(x,y,n))^2 + 1 / \sum_{(x,y) \in Z_p} (\Delta_y Z_{p,\phi}(x,y,n))^2 \right)^{-1/2}$,

где $\Delta_x Z_{p,\phi}$, $\Delta_y Z_{p,\phi}$ – градиентные изображения зоны поиска сглаженные усредняющим фильтром. В качестве характеристики, определяющей шум, рассматривается его среднеквадратическое отклонение σ_ξ .

Для повышения качества работы МА1 разработаны вспомогательные алгоритмы: алгоритм поиска дефектных пикселей и алгоритм вычисления проекции шарообразного объекта на изображение.

Четвёртая глава посвящена компьютерному моделированию и экспериментальным исследованиям разработанных алгоритмов. Также в ней рассмотрены вопросы реализации разработанных алгоритмов в БСОИиУ.

Программное обеспечение для моделирования работы БСОИиУ с КТЗ разработано в среде математического моделирования MATLAB 2012a. Исследования проводились как на полунатурных, так и на синтезированных сюжетах. Для их формирования использовались две среды компьютерного моделирования, а также стереосистема с двумя видеодатчиками.

Для оценки работоспособности алгоритмов использовались следующие количественные характеристики работоспособности (КХР):

1. Время обнаружения объекта (КХР1) в кадрах,
2. Частота правильной локализации (КХР2),
3. Продолжительность слежения с заданной среднеквадратичной ошибкой (КХР3) в кадрах,
4. Двоичная КХР, принимающая значение 1 на текущем кадре, если среднеквадратичная ошибка не превышает заданную величину, и 0 – в противном случае (КХР4).

Исследования МА1 проводились на 7 сюжетах, сформированных с помощью программного модуля в MATLAB и 18 сюжетах длительностью не менее 1000 кадров, синтезированных в средах моделирования. На синтезированных сюжетах происходило сближение управляемого ЛА (Су-33) с танкером (Ил-78) для дозаправки в воздухе.

Экспериментальные исследования МА2 проводились на 6 сюжетах длительностью не менее 1000 кадров. Сюжеты были получены с использованием стереосистемы. На сюжетах радиоуправляемая модель танка входила в поле зрения видеодатчиков стереосистемы, затем практически вплотную приближалась к ним, после чего удалялась на исходную позицию.

Сравнение МА1 и МА2 проводилось с базовыми АО и АМ в их составе.

Сравнительные исследования разработанного критерия работоспособности и двух критериев, известных из литературы, проводились с использованием натуральных сюжетов, снятых одним видеодатчиком. Длительность сюжетов варьировалась от 1000 до 1400 кадров. На сюжетах объекты были неподвижны. В процессе съемки диафрагма камеры постепенно закрывалась и открывалась вновь, что обеспечивало моделирование изменения освещенности сцены.

Также проводились экспериментальные исследования разработанного модифицированного разностного корреляционного алгоритма при наличии близкорасположенных похожих объектов на изображении, а также алгоритмов поиска конуса при различной степени его освещения и вычисления расстояния до объекта.

На рисунках 2-4 представлены кадры, иллюстрирующие работу МА1 днём и ночью, а также работу МА2 на неоднородном фоне. На рисунках 2, 3 прямоугольной рамкой отмечено расположение танкера и его заправочного конуса, вычисленное МА1 (кругом отмечен центр заправочного конуса). На рисунке 4 черная рамка показывает положение объекта на изображении, а белая рамка с кругом посередине – особой области на объекте.

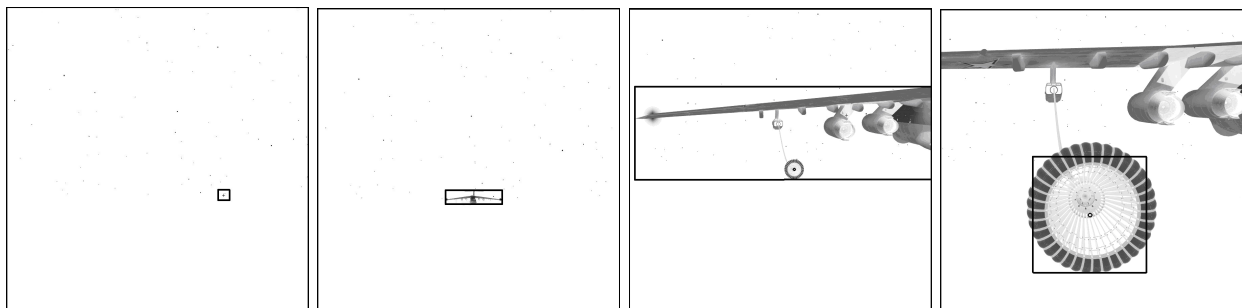


Рисунок 2 – Кадры, иллюстрирующие работу МА1 на фоне звёздного неба (изображения инвертированы для наглядности)



Рисунок 3 – Кадры, иллюстрирующие работу МА1 на фоне неба днём



Рисунок 4 – Кадры, иллюстрирующие работу МА2 на неоднородном фоне

Основные результаты оценки работоспособности разработанных алгоритмов представлены на рисунках 5 и 6, а оценки критериев работоспособности разностного корреляционного алгоритма – в таблице 1.

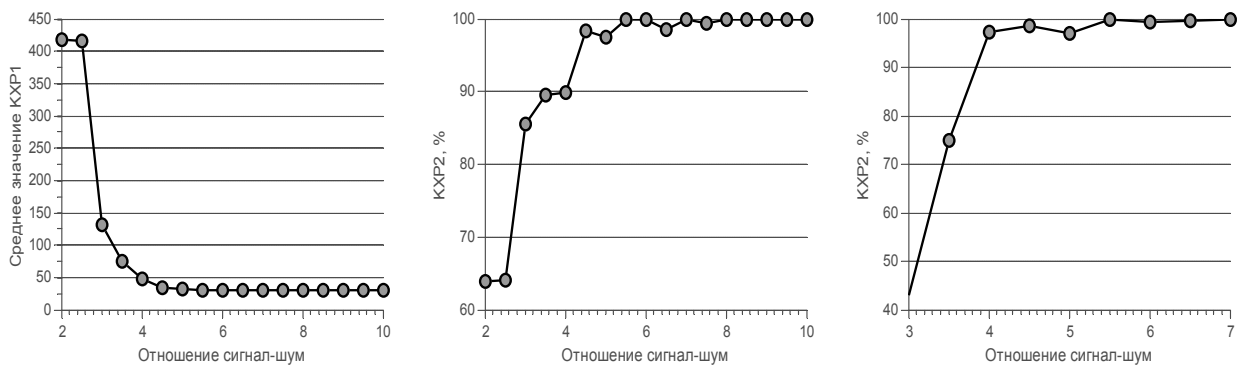


Рисунок 5 – Зависимости КХР1 для МА1 (слева), КХР2 для МА1 (в центре), КХР2 для МА2 (справа) от отношения сигнал/шум

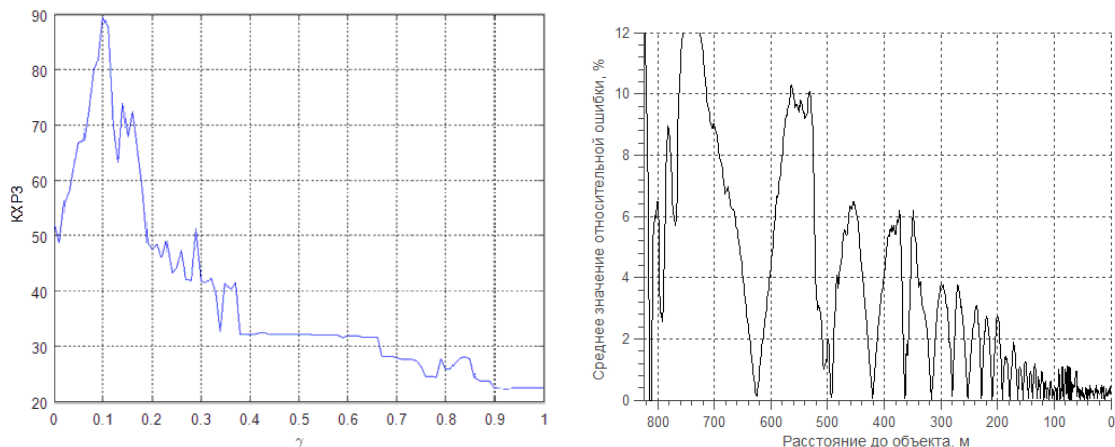


Рисунок 6 – Зависимость КХР3 модифицированного разностного алгоритма от параметра γ (слева) и график со средними значениями относительных ошибок при вычислении расстояния до объекта (справа)

Таблица 1 – Пороговые значения для оценки критериев работоспособности и ошибки классификации (K_1, K_2 – известные критерии, $K_{p.a.}$ – разработанный)

Критерий работоспособности	Пороговое значение	Ошибка первого рода, %	Ошибка второго рода, %
№1 (K_1)	1,3	0	8
№2 (K_2)	152	5	47
№3 ($K_{p.a.}$)	0,9	0	4

Основные выводы, полученные в результате экспериментальных исследований:

– МА1 позволяет обнаруживать объект приблизительно за 30-35 кадров и оценивать его координаты с частотой правильной локализации (97,6%) на фоне звёздного неба в 2,8 раза большей, а на фоне неба в дневное время в 4,4 раза большей по сравнению с базовыми алгоритмами;

– МА2 позволяет обнаруживать объект и оценивать его координаты с частотой правильной локализации (97,1%) на неоднородном фоне в 2,1 раз большей по сравнению с базовым алгоритмом;

– относительная ошибка вычисления расстояния до объекта не превышает 10% на расстоянии не более 500 метров и 2% на расстоянии менее 160 метров;

– минимальное значение отношения сигнал/шум, при котором модифицированный алгоритм обеспечивает приемлемую точность, в 2 раза ниже, чем для разностного корреляционного алгоритма (при этом γ равно 0,1);

– разработанный критерий работоспособности разностного корреляционного алгоритма обеспечивает уменьшение частоты ошибок второго рода по сравнению с известными критериями от 2 до 12 раз при сопоставимой частоте ошибок первого рода;

– работоспособность алгоритма поиска заправочного конуса на изображении сохраняется при угле между направлением обзора и направлением освещения до 60°.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основе введённых математических моделей разработаны базовые алгоритмы, предназначенные для обнаружения объектов и оценивания их траекторных параметров при различных типах фона, а также при существенных изменениях размеров объектов в процессе наблюдения. Разработан алгоритм вычисления расстояния до объекта и алгоритм поиска заправочного конуса на изображении.

2. Разработан многоэтапный алгоритм обнаружения объекта и оценивания его траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ, предназначенной для относительной навигации ЛА при дозаправке в воздухе (МА1). МА1 позволяет обнаруживать объект приблизительно за 30-35 кадров и оценивать его координаты в процессе сближения с частотой правильной локализации не менее 97,6% при допустимой ошибке не более 1,5 пикселя (что превосходит

частоту правильной локализации при использовании базовых АО и АМ на фоне звёздного неба в 2,8 раза, а на фоне неба в дневное время – в 4,4 раза), а размеры – при допустимой ошибке не более 4 пикселей при отношении сигнал/шум не хуже 5.

3. Разработан многоэтапный алгоритм обнаружения объекта и оценивания его траекторных параметров с использованием КТЗ БСОИиУ, предназначенной для относительной наземной навигации (МА2). МА2 позволяет обнаруживать объект и оценивать его координаты в процессе сближения с частотой правильной локализации не менее 97,1% при допустимой ошибке не более 3 пикселей (что превосходит частоту правильной локализации при использовании базовых АО и АМ на неоднородном фоне в 2,1 раза), а размеры – при допустимой ошибке не более 4 пикселей при отношении сигнал/шум не хуже 5.

4. Синтезирован модифицированный разностный корреляционный алгоритм оценки параметров объекта при наличии близкорасположенных похожих объектов на изображении, и предложен эвристический вариант его реализации. Минимальное значение отношения сигнал/шум, при котором модифицированный алгоритм обеспечивает приемлемую точность, в 2 раза ниже, чем для разностного корреляционного алгоритма. Разработанный алгоритм используется в составе базового алгоритма оценивания параметров заправочного конуса.

5. Разработаны правила переключения между базовыми алгоритмами, а также необходимые для их реализации критерии работоспособности многоэталонного алгоритма и разностного корреляционного алгоритма. Частота ошибок второго рода при использовании разработанного критерия работоспособности разностного корреляционного алгоритма по сравнению с известными критериями уменьшается от 2 до 12 раз при сопоставимой частоте ошибок первого рода.

6. Создано программное обеспечение, реализующее разработанные алгоритмы. С его помощью выполнены экспериментальные исследования, которые подтверждают работоспособность предложенных алгоритмов и целесообразность их использования в БСОИиУ.

7. Разработаны рекомендации к аппаратной реализации многоэтапных алгоритмов в БСОИиУ, на основе которых был реализован МА1 (для обнаружения и оценивания траекторных параметров объекта на фоне звёздного неба) на базе отладочной платы на основе ПЛИС Xilinx Virtex-7 FPGA VC707 Evaluation Kit. Полученные результаты подтверждают возможность реализации многоэтапных алгоритмов в реальном времени. Алгоритмы были реализованы в оптико-электронной системе, разрабатываемой в АО «Государственный Рязанский приборный завод».

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

1. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Корепанов С.Е. Корреляционный алгоритм слежения за движущимися объектами при наличии близкорасположенных похожих объектов // Вестник

Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань, 2010. – №2(32). – С.3-8.

2. Корепанов С.Е., Стротов В.В. Алгоритм слежения за движущимися объектами в бортовых видеоинформационных системах // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 3. – С. 21-23.

3. Стротов В.В., Корепанов С.Е. Слежение за объектом со значительно изменяющимися со временем размерами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань, 2012. – №1(39), Ч.1. – С. 9-14.

4. Корепанов С.Е. Комплексный алгоритм обнаружения и оценки параметров объектов в системе технического зрения, предназначенной для относительной навигации летательных аппаратов при дозаправке в воздухе // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань, 2016. – №2 (56). – С. 114-123.

5. Корепанов С.Е., Смирнов С.А., Стротов В.В. Сравнение трех критериев работоспособности многоэталонного алгоритма оценки координат объектов // Цифровая обработка сигналов. – 2016. – № 3. – С. 15-18.

Публикация в издании, входящем в международные базы цитирования Scopus и Web of Science

6. Alpatov B., Korepanov S., Strotov V. A composite algorithm for variable size object tracking for high performance FPGA-based on-board vision systems // SPIE Remote Sensing. – International Society for Optics and Photonics, 2014. – pp. 92470A-92470A-8.

Статья в сборнике научных трудов

7. Бабаян П.В., Корепанов С.Е.. Слежение за движущимися объектами в присутствии близкорасположенных похожих объектов // Обработка информации в автоматических системах: сборник научных трудов. – Рязань: РГРТУ, 2009. – С. 19-29.

Тезисы докладов на конференциях и семинарах

8. Бабаян П.В., Корепанов С.Е. Алгоритм формирования проекции объекта на изображение в системах технического зрения // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: XX всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых учёных и специалистов. – Рязань, 2015. – С. 206-207.

9. Бабаян П.В., Корепанов С.Е. Корреляционный алгоритм автоматического слежения за объектами в сложных условиях наблюдения // Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA-2008: тез. докл. 10-й международной конференции. – М., 2008. Т. 2. – С. 449-451.

10. Бабаян П. В., Корепанов С.Е. Исследование алгоритма слежения за объектами в сложных условиях наблюдения // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и телекоммуникаций: материалы 15-й международной научн.-техн. конф. – Рязань, 2008. – Ч.1. – С. 120-122.

11. Алпатов Б.А., Корепанов С.Е. Исследование алгоритма измерения координат объекта с межкадровой фильтрацией изображения // Искусственный интеллект в XXI веке. Решения в условиях неопределенности: сборник статей VI всероссийской научн.-техн. конф. – Пенза, 2008. – С. 36-38.

12. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Корепанов С.Е., Смирнов С.А. Автоматический анализ условий наблюдения в системах автоматического обнаружения и сопровождения объектов // Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы: материалы международной научн.-техн. конф. Т.2. – Таганрог, 2009. – С. 233-235.

13. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Корепанов С.Е. Автоматизированная оценка работоспособности алгоритмов для систем видеослежения объектов // Авиация и космонавтика 2009: 8-я международная конференция. – М., 2009 – С. 115-116.

14. Бабаян П.В., Корепанов С.Е. Алгоритм обнаружения и оценки параметров объектов в условиях существенных изменений расстояния до объекта наблюдения // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций:

материалы 16-й международной научно-технической конференции. – Рязань, 2010. – С. 20-21.

15. Корепанов С. Е., Стротов В. В. Комплексный подход к слежению за объектом, размеры которого значительно изменяются со временем // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами 2012: сборник трудов науч.-техн. конф. – М., 2012. – С. 118-123.

16. Корепанов С.Е., Баранцев А.А. Определение координат и расстояния до объекта с использованием технического зрения при дозаправке в воздухе // Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA-2016: тез. докл. 18-й международной конференции. – М., 2016. – С. 647-651.

17. Корепанов С.Е. Алгоритм автоматического сопровождения объектов в сложных условиях наблюдения // К.Э.Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика: тез. докл. 5-й международной научно-технической конференции. – Рязань, 2007. – С. 146-148.

18. Бабаян П.В., Смирнов С.А. Слежение за объектом на основе алгоритма сопоставления с эталоном при одновременном наблюдении в видимом и инфракрасном диапазонах // Цифровая обработка сигналов. – №4. – 2010. – С.18-21.

19. Корепанов С.Е. Автоматическое слежение за объектами при существенном изменении их размеров в процессе наблюдения // Новые информационные технологии в научных исследованиях: XVI Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, молодых учёных и специалистов. – Рязань, 2011. – С. 313-314.

20. Корепанов С.Е. Алгоритм обработки изображений в системе технического зрения для относительной навигации летательных аппаратов при дозаправке в воздухе // Техническое зрение в системах управления-2016: Сб. тезисов науч.-техн. конф. – М., 2016. – С.10. [Электронный ресурс] <http://tvcs2016.technicalvision.ru/file/tezis.pdf> (дата обращения: 20.06.2016).

21. Корепанов С.Е. Исследование алгоритма слежения за движущимися объектами в присутствии близкорасположенных похожих объектов // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: XIV Всероссийская научно-техническая конф. студентов, молодых учёных и специалистов. – Рязань, 2009. – С. 312-313.

22. Корепанов С.Е. Исследование алгоритма слежения за объектами в замкнутом контуре // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: XIII Всероссийская научно-техническая конф. студентов, молодых учёных и специалистов. – Рязань, 2008. – С.117-119.

Корепанов Семен Евгеньевич
**АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ И ОЦЕНИВАНИЯ ИХ
 ТРАЕКТОРНЫХ ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАНАЛОВ
 ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ
 ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ**

Автореферат
 диссертации на соискание учёной степени
 кандидата технических наук