

На правах рукописи

МУРАВЬЕВ Вадим Сергеевич

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ
ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ
ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ**

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

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2010

Работа выполнена в ГОУВПО Рязанский государственный радиотехнический университет.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Алпатов Борис Алексеевич

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор
Кузнецов Алексей Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент
Муртазов Андрей Константинович

Ведущая организация: ФГУП «Конструкторское бюро
машиностроения», г. Коломна

Защита состоится **30 июня 2010 г.** в **12 часов** на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в ГОУВПО Рязанский государственный радиотехнический университет по адресу:

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО Рязанский государственный радиотехнический университет.

Автореферат разослан «___» мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Пржегорлинский В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Задачи цифровой обработки изображений можно условно разделить на два больших класса: повышение качества изображений для улучшения его визуального восприятия человеком и обработка изображений с целью их классификации, распознавания и анализа в системах технического зрения. И если при решении первого класса задач был достигнут значительный прогресс, то решение второго класса задач столкнулось с рядом трудностей, среди которых можно отметить: отсутствие математических моделей, адекватно описывающих наблюдаемую обстановку, несовершенство датчиков изображений, недостаточную производительность вычислительных систем и ряд других. Вместе с тем достижения последних десятилетий в науке и технике позволяют говорить о значительных успехах в преодолении этих проблем.

Развитие технологий обработки изображений способствует интенсивному внедрению видеоинформационных комплексов для решения задач навигации, космического мониторинга Земли, контроля качества и количества производимой продукции, обеспечения безопасности важнейших объектов, передачи и сжатия видеоинформации и т.п. Одним из направлений создания этих комплексов является разработка систем анализа и обработки изображений, которые предназначены, в первую очередь, для установки на подвижных носителях, таких как самолёты, вертолёты, автомобили и другие транспортные средства. Назначением подобных систем является решение задач обнаружения движущихся и неподвижных объектов, оценки их параметров, распознавания, построения траекторий движения.

Постоянное совершенствование средств вычислительной техники приводит к расширению сферы практического применения методов и алгоритмов обработки изображений. Так, комплексы обработки изображений реального времени начали активно применяться в системах автоматического сопровождения воздушных объектов, наблюдаемых на фоне ясного или облачного неба, с целью решения задач их обнаружения и оценки параметров. Необходимо отметить, что ранее для этих целей использовались преимущественно радиолокационные станции (РЛС). К числу существенных недостатков РЛС можно отнести присутствие “слепой зоны”, чувствительность к постановкам помех, высокую стоимость, значительные габариты и ограничения по угловому разрешению, связанные с шириной диаграммы направленности антенны. Кроме этого, во многих случаях применение активных способов наблюдения, связанных с облучением объекта электромагнитными волнами, нежелательно, так как приводит к демаскировке положения излучателя. Решить указанные проблемы возможно путем использования современных телевизионных и тепловизионных датчиков для получения изображения объекта с последующей компьютерной обработкой и анализом видеоинформации. Область использования технологий автоматического выделения и оценки параметров воздушных объектов включает в себя задачи обеспечения безопасности аэропортов и важных

промышленных предприятий, контроль и мониторинг воздушного движения, аэронавигацию и т.д.

В настоящее время разработано множество алгоритмов выделения и оценки параметров объектов. Однако известные подходы зачастую обладают большой вычислительной сложностью и не в полной мере учитывают специфику рассматриваемой задачи и особенности применяемых на практике датчиков изображений. Таким образом, разработка эффективных алгоритмов выделения, обнаружения и оценки параметров для систем автоматического сопровождения воздушных объектов до настоящего времени остается весьма актуальной задачей.

Степень разработанности темы.

Вопросы выделения и оценки параметров воздушных объектов по данным видеонаблюдений достаточно широко представлены в отечественной и зарубежной литературе. Значительный вклад в разработку методов и алгоритмов решения данной задачи внесли работы таких учёных как Б.А. Алпатов, П.А. Бакут, В.Г. Лабунец, А.П. Трифонов, И.Н. Пустынский, D. Braunreiter, V. Li, J. Silverman, Q. Pham и др.

Несмотря на большое количество работ по данной тематике, в результате проведенного анализа не было выявлено публикаций, в которых в полной мере учитывается специфика задач выделения, обнаружения и оценки параметров воздушных объектов с большим диапазоном варьирования размеров, наблюдаемых тепловизионными и телевизионными датчиками на фоне ясного или облачного неба. В ряде работ рассматриваются алгоритмы, позволяющие обнаруживать точечные и малоразмерные воздушные объекты, однако они преимущественно ориентированы на обработку изображений, получаемых с тепловизионных датчиков и часто не способны эффективно обнаруживать протяженные объекты. Синтезированы оптимальные алгоритмы обнаружения и измерения координат объектов, предполагающие известную корреляционную матрицу фона. Существенным ограничением является то, что при больших размерностях изображения требуемая операция нахождения обратной матрицы является очень ресурсоемкой. Разработаны многоэтапные пространственно-временные алгоритмы выделения объектов, но им присущ такой недостаток, как необходимость четкого задания модели движения объектов.

Таким образом, **цель диссертации** состоит в разработке эффективных алгоритмов решения задачи выделения и оценки параметров воздушных объектов в комплексах обработки изображений для систем автоматического сопровождения. Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие **основные задачи**:

- обзор и анализ существующих алгоритмов выделения и обнаружения объектов;
- формирование модели фоноцелевой обстановки и признаков выделения объектов на основе созданной библиотеки реальных видеосюжетов;
- синтез оптимального алгоритма обнаружения воздушных объектов;
- построение многоэтапного алгоритма выделения, обнаружения и оценки параметров воздушных объектов для систем автоматического сопровождения;

- разработка методики и проведение экспериментальных исследований эффективности разработанных алгоритмов с использованием набора тестовых видеосюжетов, выработка рекомендаций по параметрической настройке алгоритмов при различной фоноцелевой обстановке;
- модернизация разработанных алгоритмов с учетом полученных экспериментальных данных и аппаратных ограничений;
- моделирование и проведение натурных испытаний разработанных алгоритмов выделения и оценки параметров воздушных объектов в составе системы автоматического сопровождения.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней на основе введенных моделей с использованием теории статистических решений синтезирован оптимальный алгоритм обнаружения воздушных объектов и разработан многоэтапный алгоритм выделения, обнаружения и оценки параметров объектов, ориентированный на применение в системах реального времени. Эффективность разработанных подходов получила экспериментальное подтверждение.

Методы исследования.

Теоретические исследования в настоящей работе выполнены на основе методов теории статистических решений, теории вероятностей, теории оценивания. Экспериментальные исследования выполнялись на реальных и синтезированных видеосюжетах с использованием методов математической статистики.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждены корректным использованием математического аппарата, компьютерным моделированием разработанных алгоритмов, результатами экспериментальных исследований, а также опытом практического внедрения.

Реализация и внедрение.

Разработанные в диссертации модели и алгоритмы использованы при выполнении научно-исследовательских работ, проводимых в Рязанском государственном радиотехническом университете по заказам Федерального агентства по образованию и Федерального агентства по науке и инновациям РФ (НИР 6-03Г, НИР 14-03Г, НИР 26-03Г, НИР 7-06Г, НИР 10-08Г, НИР 17-08Г, НИР 12-09Г, 23-09), Российского фонда фундаментальных исследований (НИР 35-06Г), ФГУП “Государственный Рязанский приборный завод” (НИР 1-04, НИР 23-05, НИР 5-06, НИР 2-07, НИР 1-08, НИР 7-09), при выполнении ОКР, проводимых ФГУП “Государственный Рязанский приборный завод” по заказам ОАО “Ульяновский механический завод”, ОАО “Радиозавод” г. Пенза, ГУП “КБП” г. Тула, ОАО “НИЭМИ” г. Москва в рамках работ по модернизации зенитно-ракетных комплексов “Квадрат”, “Бук”, “Оса”, зенитного ракетно-пушечного комплекса “Тунгуска-М1”, а также на инициативной основе с целью совершенствования пункта управления ПУ-12М7 для борьбы с БПЛА.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

– 13-й, 14-й и 15-й международных научно-технических конференциях “Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций” (Рязань – 2004, 2005, 2008);

– 11-й и 12-й всероссийских конференциях “Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании” (Рязань – 2006, 2007);

– 8-й и 9-й международных научно-технических конференциях “Цифровая обработка сигналов и ее применения” (Москва – 2006, 2007);

– 5-й международной научно-технической конференции “Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика” (Рязань – 2007);

– 30-й, 31-й и 32-й всероссийских научно-практических конференциях “Сети, системы связи и телекоммуникации” (Рязань – 2005-2007);

– 2-й всероссийской научной конференции “Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB” (Москва – 2004);

– 1-й международной научной конференции МАА-РАКЦ “Космос для человечества” (Королёв – 2008);

– 1-й международной научно-технической конференции “Проблемы автоматизации и управления в технических системах” (Пенза – 2009).

Выступление на 11-й всероссийской научно-технической конференции “Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании” (2006) отмечено дипломом за лучший доклад.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе четыре статьи, из них две в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов кандидатских диссертаций. Результаты исследований отражены в 15 отчётах по НИР.

Основные результаты, выносимые на защиту:

– модель фоноцелевой обстановки, на основе которой синтезирован оптимальный алгоритм обнаружения объектов;

– пространственно-временной алгоритм выделения объектов, наблюдаемых на облачных фонах;

– модифицированный алгоритм выделения объектов с процедурой подстройки параметров;

– многоэтапный алгоритм выделения, обнаружения и оценки параметров объектов, наблюдаемых на ровных и облачных фонах.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (94 источника), изложенных на 155 страницах, содержит 64 рисунка и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** диссертации формулируется качественная постановка задачи выделения и оценки параметров воздушных объектов, выполняется обзор и анализ существующих подходов к ее решению. Рассмотрены основные компоненты системы автоматического сопровождения объектов, приведена общая структура алгоритмов выделения и обнаружения воздушных объектов.

Представлен краткий обзор существующих датчиков изображений ТВ и ИК диапазонов, рассмотрены факторы, влияющие на качество формируемого изображения.

Типовая структура системы автоматического сопровождения воздушных объектов приведена на рисунке 1.

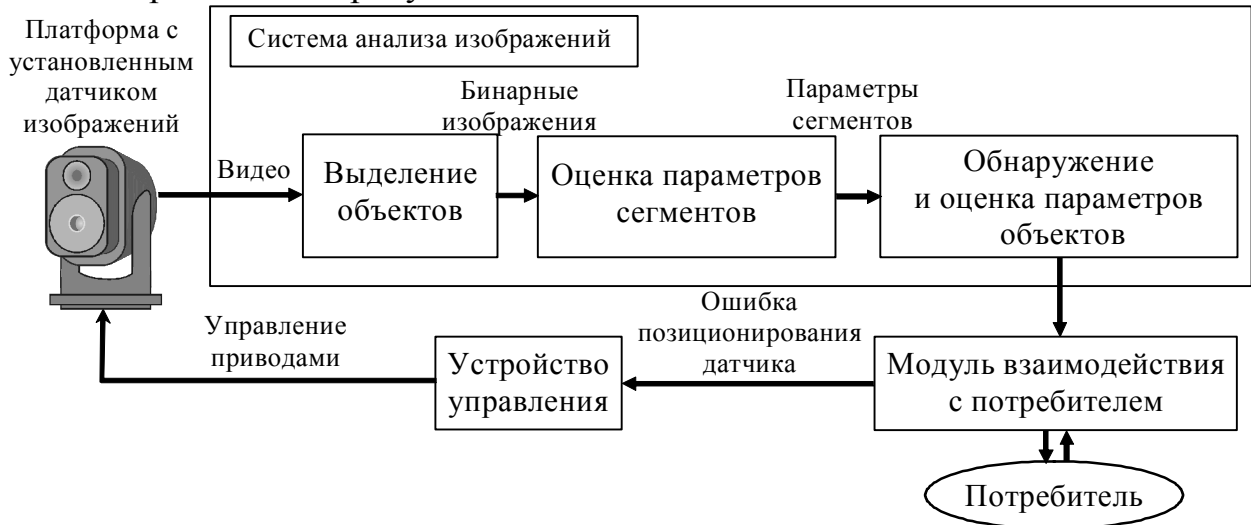


Рисунок 1 – Структура системы автоматического сопровождения воздушных объектов

В работе предполагается, что датчик формирует последовательность изображений размерностью 720x576 пикселей с частотой дискретизации 25 кадров в секунду, поступающих на вход системы анализа изображений. Первоначальным этапом обработки, как правило, является этап выделения объектов, состоящий в получении бинарной маски, определяющей положение и форму объектов на наблюдаемом изображении. На практике в процессе выделения объектов любой алгоритм будет допускать ошибки, которые возможно устранить путем применения процедур обработки бинарного изображения и списка сегментов.

По окончании обработки каждого кадра потребителю выдается список таких параметров объектов, как яркость, размеры, координаты центра и др. Устройство управления необходимо для минимизации рассогласования между реальным направлением оптической оси датчика и желаемым, которое в большинстве случаев совпадает с направлением на объект. Совмещение этих направлений с целью постоянного поддержания визуального контакта с выбранным объектом и составляет суть задачи сопровождения.

Примерами наблюдаемых объектов могут служить самолёты, вертолёты, ракеты, наблюдаемые на дальностях от 500 м до нескольких десятков километров как на ровных, так и контрастных облачных фонах. Исходя из удаленности воздушных объектов, характеристик датчиков и возможных полей зрения, размеры наблюдаемых объектов на изображении могут лежать в широком диапазоне значений от 2x2 до 50x50 элементов разложения. При этом учитывается тот факт, что применяемые на практике датчики имеют возможность аппаратного масштабирования изображения.

В системах автоматического сопровождения воздушных объектов датчик размещается на поворотном устройстве, прикреплённом к корпусу носителя. Будем считать, что поле зрения камеры может перемещаться, что в итоге приводит к сдвигам всего изображения. Формируемые последовательности изображений также могут быть искажены шумом, источником которого является датчик изображения.

В диссертации рассмотрены основные физические явления, которые порождают шум на изображении. Для датчиков, построенных на основе ПЗС матриц и линеек, модель шума может быть представлена в следующем виде:

$$\xi(i, j) = k_y (\xi_{\text{дш}}(i, j) + \xi_{\text{тм}}(i, j) + \xi_{\text{тс}}(i, j) + \xi_{\text{кв}}(i, j)) + \xi_y(i, j), \quad (1)$$

где $\xi_{\text{дш}}(i, j)$ – дробовой шум, $\xi_{\text{тс}}(i, j)$ – ток смещения, $\xi_{\text{тм}}(i, j)$ – темновой ток, $\xi_{\text{кв}}(i, j)$ – равномерно распределенный шум квантования, $\xi_y(i, j)$ – шум усилителя, распределенный по гауссовскому закону, k_y – коэффициент усиления. При использовании высококачественных видеодатчиков слагаемое $\xi_y(i, j)$ будет вносить наибольший вклад в формирование шума, тогда $\xi(i, j)$ можно считать гауссовским с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_ξ^2 .

Таким образом, достаточно часто задачу выделения и оценки параметров воздушных объектов необходимо решать при наличии мешающих факторов, к которым можно отнести: присутствие контрастного облачного фона, пространственное перемещение датчика изображений, заслонение объекта фоном, интенсивный шум. Недостатки существующих подходов обусловили необходимость разработки многоэтапных пространственно-временных алгоритмов, способных работать в отмеченных условиях наблюдения. Также необходимо принимать во внимание, что алгоритмы выделения и обнаружения объектов должны быть ориентированы на обработку полного кадра изображения в реальном масштабе времени при большом диапазоне варьирования размеров объектов. Для достижения данной цели требуется учитывать всю имеющуюся априорную информацию о характеристиках объекта и фона.

Вторая глава диссертации посвящена решению задач выделения, обнаружения и оценки параметров воздушных объектов на изображениях, формируемых датчиками ТВ и ИК диапазонов.

За основу была принята следующая модель наблюдения:

$$l(i, j, n) = h(i, j, n)r(i, j, n) + g(i, j, n)(1 - r(i, j, n)) + \xi(i, j, n), \quad (i, j) \in R, n = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где N – количество наблюдаемых кадров, $R = \{(i, j) : i = \overline{0, N_x - 1}; j = \overline{0, N_y - 1}\}$ – множество точек, на котором задано изображение, N_x, N_y – размеры изображения по вертикали и горизонтали, $l(i, j, n)$ – наблюдаемое изображение, $g(i, j, n)$ и $h(i, j, n)$ – яркости точек фона и объектов соответственно в кадре n , $r(i, j, n)$ – бинарная маска, определяющая положение объектов, $\xi(i, j, n)$ – аддитивный шум датчика.

С целью аналитического решения задачи обнаружения, состоящей в принятии решения о присутствии/отсутствии объекта на изображении, в работе вводятся модели, описывающие яркости точек объекта и фона. При наблюдении удаленного объекта известной конфигурации на фоне неба с помощью датчика видимого диапазона яркости объекта и фона в кадре считаются постоянными, но заранее неизвестными величинами с плотностями распределения $p(h) = p(g) = \frac{1}{l_{\max}}$, при $h \in [0; l_{\max}]$, $g \in [0; l_{\max}]$. Также считается, что $\xi(i, j, n)$ – белый гауссовый шум с нулевым средним и известной дисперсией σ_ξ^2 . Положение объекта неизвестно, но предполагается, что координаты (α, β) , задающие его местоположение на изображении, являются дискретной векторной случайной величиной, подчиняющейся равномерному закону распределения. Количество возможных положений объекта в кадре равно $N_{x\alpha}N_{y\beta}$, где $N_{x\alpha} = N_x - V_{o\bar{o}} + 1$, $N_{y\beta} = N_y - W_{o\bar{o}} + 1$, $(V_{o\bar{o}}, W_{o\bar{o}})$ – соответственно высота и ширина ограничивающего объект прямоугольника.

Для выбора между гипотезой X_1 о присутствии объекта и альтернативной гипотезой X_0 составляется отношение правдоподобия Λ , которое сравнивается с порогом. С учетом предложенных моделей, описывающих яркости точек объекта и фона, (2) принимает вид:

$$X_1 : l(i, j) = \begin{cases} h + \xi(i, j), & (i, j) \in H_{(\alpha_{o\bar{o}}, \beta_{o\bar{o}})}, \\ g + \xi(i, j), & (i, j) \in G_{(\alpha_{o\bar{o}}, \beta_{o\bar{o}})}; \end{cases} \quad (3)$$

$$X_0 : l(i, j) = g + \xi(i, j), (i, j) \in R,$$

где $H_{o\bar{o}}$ – множество, задающее координаты точек объекта на изображении, $G_{o\bar{o}} = R / H_{o\bar{o}}$. Выражение для Λ будет равно:

$$\Lambda = \frac{\sum_{\alpha=0}^{N_{x\alpha}-1} \sum_{\beta=0}^{N_{y\beta}-1} p(\alpha, \beta) \int \int p_1(L | g, h, \alpha, \beta) p(h) p(g) dh dg}{\int p_0(L | g) p(g) dg}, \quad (4)$$

где $p_1(L | g, h, \alpha, \beta)$ – многомерная плотность распределения наблюдаемого изображения при наличии объекта, $p_0(L | g)$ – многомерная плотность распределения наблюдаемого изображения при отсутствии объекта, L – вектор, состоящий из яркостей точек наблюдаемого изображения.

В работе показано, что с учетом сделанных допущений, оптимальное по критерию Неймана-Пирсона правило принятия решения заключается в проверке следующего условия:

$$\frac{1}{N_{x\alpha}N_{y\beta}} \sum_{\alpha=0}^{N_{x\alpha}-1} \sum_{\beta=0}^{N_{y\beta}-1} \exp\left(\frac{1}{2\sigma_\xi^2} \frac{S_g S_h}{N_x N_y} (\hat{h}_{\alpha, \beta} - \hat{g}_{\alpha, \beta})^2\right) > C/k_\Lambda, \quad (5)$$

где C – константа, зависящая от заданной величины ложной тревоги,

$$k_\Lambda = \frac{\sqrt{2\pi}\sigma_\xi \sqrt{N_x N_y}}{l_{\max} \sqrt{S_h S_g}}, \quad S_h - \text{площадь объекта}, \quad S_g = N_x N_y - S_h, \quad \hat{h}_{\alpha, \beta}, \hat{g}_{\alpha, \beta} -$$

усредненные значения яркостей объекта и фона, вычисляемые для всех α и β в областях, определяемых конфигурациями точек объекта и фона.

Помимо принятия решения о присутствии искомого объекта на изображении необходимо находить оценки $(\hat{\alpha}_{об}, \hat{\beta}_{об})$ координат, задающих его местоположение. В диссертации эта задача решается путем применения критерия максимального правдоподобия. Показано, что алгоритм обнаружения объекта и измерения его координат состоит в максимизации критериальной функции $F(\alpha, \beta) = \left| \hat{h}_{\alpha, \beta} - \hat{g}_{\alpha, \beta} \right|$ и сравнении максимального значения с порогом, зависящим от площади объекта, размеров изображения и СКО шума. В случае принятия гипотезы о наличии объекта в кадре его координаты на изображении будут определяться как $(\hat{\alpha}_{об}, \hat{\beta}_{об}) = \arg \max_{\alpha, \beta} (F(\alpha, \beta))$.

В реальных условиях наблюдения конфигурации объектов на изображении неизвестны, поэтому требуется решать задачу их выделения. Так как изображения могут быть искажены воздействием шума различной природы, а фон может быть как ровным, так и содержать разнородную облачность, то получить аналитическое решение задачи выделения, в общем случае, не удастся. Опираясь на результаты теоретических исследований, в диссертации разработан эвристический алгоритм выделения объектов. В соответствии с этим подходом на первом этапе наблюдаемое изображение $l(i, j, n)$ фильтруется во времени по формуле:

$$\hat{l}(i, j, n) = \gamma \cdot \hat{l}(i, j, n-1) + (1 - \gamma) \cdot l(i, j, n), \quad i = \overline{0, N_x - 1}, j = \overline{0, N_y - 1}, \quad (6)$$

где $\hat{l}(i, j, n), \hat{l}(i, j, n-1)$ – изображения, сглаженные во времени к n -му и $n-1$ -му кадру соответственно, γ – коэффициент сглаживания. После процедуры фильтрации для каждой точки находится разность $d_{gp}(i, j, n)$ между наблюдаемым изображением и оценкой $\hat{l}(i, j, n-1)$, умноженной на некоторый коэффициент k_{st} :

$$d_{gp}(i, j, n) = l(i, j, n) - k_{st} \cdot \hat{l}(i, j, n-1), \quad (7)$$

Применение (6), (7) при $k_{st} = 1$ и условии неподвижности фона приводит к существенному подавлению шума датчика и позволяет повысить контраст изменяющихся областей наблюдаемого изображения. Такие изменения чаще всего обусловлены перемещением объекта. Однако в силу движения видеодатчика наблюдаемые изображения подвергаются воздействию геометрических преобразований. Разработанные алгоритмы компенсации геометрических преобразований изображений требуют дополнительных вычислительных затрат для их реализации и не всегда бывают эффективны при наблюдении изображений, содержащих однородный фон. Положение усложняет тот факт, что объекты, которые требуется обнаруживать, могут быть как движущимися, так и неподвижными. Для обеспечения компромисса между достоинствами и недостатками временной обработки по выражениям (6), (7)

значения коэффициента k_{st} могут выбираться дробными в диапазоне от нуля до единицы.

На втором этапе для более точного оценивания яркости объекта и снижения влияния шумов значение анализируемого пикселя усредняется со своими ближайшими соседями, для чего полученная после временной фильтрации разность $d_{gp}(i, j, n)$ обрабатывается линейным усредняющим фильтром, имеющим маску $w_1(m_x, m_y) = 1/q_1^2$, $m_x, m_y = \overline{-(q_1 - 1)/2, (q_1 - 1)/2}$ размерности $q_1 \times q_1$. Параллельно с этим $d_{gp}(i, j, n)$ обрабатывается фильтром с маской $w_2(m_x, m_y)$:

$$w_2(m_x, m_y) = \begin{cases} 0, & \text{при } m_x, m_y = \overline{-(q_1 - 1)/2, (q_1 - 1)/2}, \\ 1 / (q_2^2 - q_1^2), & \text{иначе} \end{cases} \quad (8)$$

размерности $q_2 \times q_2$, причем $q_2 > q_1$. Данная операция предназначена для оценки остаточного фона, содержащегося в $d_{gp}(i, j, n)$. При аппаратной реализации описываемого алгоритма имеется возможность существенно сократить вычислительную трудоемкость процедуры фильтрации, так как при свертке обрабатываемого изображения фактически отсутствуют операции умножения на весовые коэффициенты.

На конечном этапе осуществляется процедура компенсации фона, для чего находится разность $d_{np}(i, j, n) = f_1(i, j, n) - f_2(i, j, n)$, где $f_1(i, j, n)$ и $f_2(i, j, n)$, $i = \overline{0, N_x - 1}$, $j = \overline{0, N_y - 1}$ – выходные изображения, полученные после обработки $d_{gp}(i, j, n)$ фильтрами с масками w_1 и w_2 соответственно. Вычисление разности $d_{np}(i, j, n)$ с помощью пространственной фильтрации имеет много общего с нахождением подэкспоненциального выражения в левой части (5), с тем отличием, что оценка фона вычисляется не во всем кадре, а в области меньшего размера, определяемой маской w_2 . Бинаризация осуществляется в соответствии с правилом:

$$\hat{r}(i, j, n) = \begin{cases} 1, & |d_{np}(i, j, n)| > k \cdot \hat{\sigma}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (9)$$

где k – пороговый коэффициент, $\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=0}^{N_x-1} \sum_{j=0}^{N_y-1} d_{np}^2(i, j, n)}$ – оценка среднеквадратического отклонения шума, вычисляемая во всей области кадра. Результаты численного моделирования показывают, что практически оценка $\hat{\sigma}^2$ сводится к нахождению второго начального момента, так как математическое ожидание остаточного шума, как правило, близко к нулю.

На изображениях, формируемых датчиками ИК диапазона, интересующие воздушные объекты зачастую имеют положительный тепловой контраст

относительно фона, поэтому целесообразно не вычислять модуль разности $d_{np}(i, j, n)$ при пороговой обработке.

В некоторых случаях объекты наблюдаются на контрастном фоне с резкими перепадами яркости, появляющимися из-за того, что в поле зрения видеокамеры попадают деревья, сооружения, элементы искусственных конструкций и т.д. Для улучшения качества работы рассмотренного выше алгоритма в данных условиях его предлагается модифицировать путем использования процедуры предварительной сегментации изображений с целью получения бинарной маски $r_c(i, j, n)$, являющейся результатом выделения протяженных контрастных областей. Располагая изображением $r_c(i, j, n)$, можно сократить число лишних сегментов путем обнуления тех точек в $\hat{r}(i, j, n)$, которые были отличны от нуля в $r_c(i, j, n)$.

Задача получения бинарной маски $r_c(i, j, n)$ решается путем использования вычислительно простой процедуры сегментации. Для этого $l(i, j, n)$ сглаживается линейным пространственным фильтром, вычисляется гистограмма $p(l_c)$ отфильтрованного изображения $l_c(i, j, n)$ и находится некоторое бинарное изображение $r_s(i, j, n)$ по правилу

$$r_s(i, j, n) = \begin{cases} 1, & \text{при } p(l_c) < T, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad i = \overline{0, N_x - 1}, j = \overline{0, N_y - 1}, \text{ где } T - \text{порог. Так как}$$

полученная бинарная маска может содержать сегменты, порожденные присутствием объектов в наблюдаемом кадре, то $r_s(i, j, n)$ подвергается процедуре разметки и на выходном изображении сохраняются только протяженные граничные сегменты. Причем сегмент считается граничным, если он касается как минимум двух сторон обрабатываемой зоны кадра. Пример наблюдаемого и обработанных изображений приведен на рисунке 2.

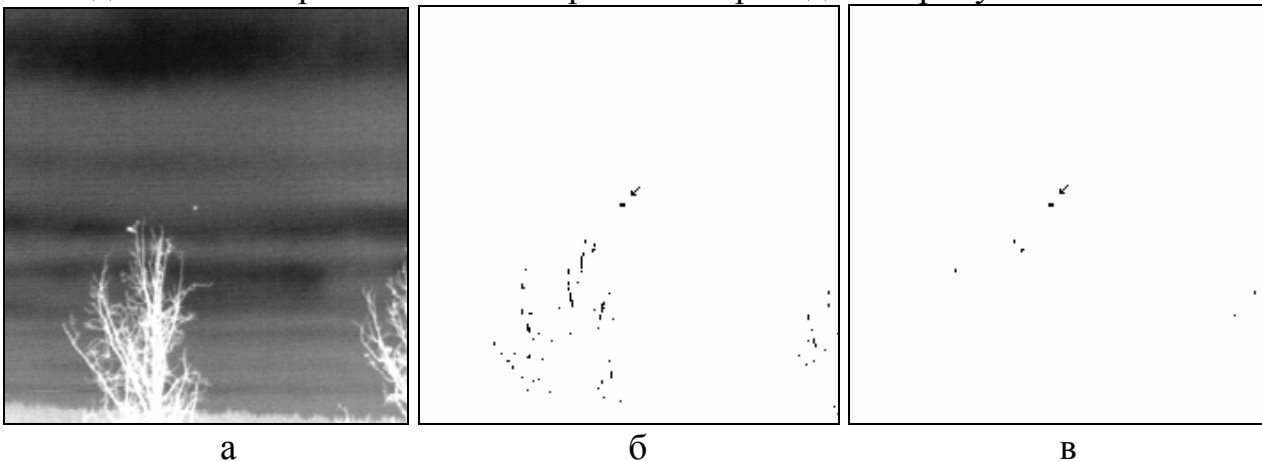


Рисунок 2 – Примеры: а- наблюдаемого изображения; б- инвертированной маски $\hat{r}(i, j, n)$; в- инвертированного бинарного изображения, формируемого модифицированным алгоритмом выделения объектов

После получения итогового бинарного изображения необходимо уменьшить степень фрагментации сегментов (связных областей) и подавить точечный шум, для чего осуществляется морфологическая обработка бинарных

изображений, заключающаяся в последовательном применении операций морфологического закрытия и открытия с квадратными структурирующими элементами. Полученные бинарные изображения могут подвергаться дополнительной межкадровой обработке с целью улучшения связности сегментов. Переход от бинарного изображения к представлению результатов обработки в виде списка параметров связных областей изображения производится с помощью процедуры разметки и параметризации. Исходя из параметров найденных сегментов и имеющейся априорной информации, можно принять решение о наличии объектов в обрабатываемой области кадра. Сегменты, не прошедшие проверку, удаляются из дальнейшего рассмотрения. Для сопоставления списков объектов, найденных на текущем и предыдущем кадрах, и присвоения каждому объекту уникального номера применяется алгоритм стробирования. Селекция объектов в стробе осуществляется исходя из минимума расстояния между центром объекта и центром строба.

С целью повышения качества обнаружения объектов и учета особенностей работы оператора предложено ввести дополнительный канал пространственной фильтрации и пороговой обработки. В обоих каналах осуществляется пространственная обработка по формулам (6)-(9), но значения размеров маски w_2 и порогового коэффициента первого и второго каналов, положения и размеры зон обработки отличаются. Каждый канал генерирует свое бинарное изображение, а для получения результата выделения объектов в виде единого бинарного изображения точки бинарного изображения 1-го канала, попадающие в область обработки второго канала, замещаются точками изображения с выхода канала 2. Первоначально работает только канал, предназначенный для выделения и обнаружения объектов, размеры которых лежат в широком диапазоне. Параметры канала фиксированы и не меняются с течением времени. При выделении сегмента, порожденного присутствием интересующего объекта, последний может быть взят на сопровождение. В этом случае включается второй канал, зона пространственной обработки которого соответствует стробу слежения за интересующим объектом, что позволяет точнее оценить дисперсию шума на этапе получения бинарного изображения. Размер q_{2c} маски фильтра w_2 на следующем после включения дополнительного канала кадре выбирается исходя из выражения:

$$q_{2c}(n+1) = \begin{cases} q_{2c}(n)k_{cl} + \max(\tilde{H}, \tilde{W})(1 - k_{cl}), & \text{при } \max(\tilde{H}, \tilde{W}) < q_{2p}, \\ q_{2c}(n)k_{cl} + 3\max(\tilde{H}, \tilde{W})(1 - k_{cl})/2, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (10)$$

где $(\tilde{V}_{об}, \tilde{W}_{об})$ – измеренные значения высоты и ширины объекта на изображении, k_{cl} – коэффициент сглаживания, q_{2p} – граничное значение q_{2c} . Подстройка значений порогового коэффициента в дополнительном канале в кадре $n+1$ осуществляется в зависимости от числа найденных объектов в стробе на текущем кадре.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям разработанных алгоритмов выделения и обнаружения воздушных объектов. В данной главе описаны методики количественного анализа эффективности

работы рассматриваемых алгоритмов, приведены результаты статистического моделирования с привлечением как искусственных изображений, так и естественных видеопоследовательностей, выбранных из созданной библиотеки видеосюжетов. Выполнено сравнительное исследование качества выделения и обнаружения воздушных объектов на натуральных видеосюжетах.

При исследовании качества работы алгоритмов использовались как визуальная, так и количественная оценки. Фон на использованных сюжетах был как неподвижным, так и движущимся со скоростью до нескольких десятков пикселей за кадр. Использовались сюжеты как с однородным фоном, так и с присутствием кучевых облаков, деревьев, элементов искусственных конструкций, размеры объектов изменялись от 2x2 пикселей до 55x40 пикселей. С целью уменьшения искажений, вызванных использованием датчиков с чересстрочной разверткой, применялась интерполяция изображения по полукадрам.

Для количественного анализа работы алгоритмов выделения объектов использовались следующие методики: строились зависимости частоты правильного выделения точек объекта от частоты ложного выделения точек объекта; определялась зависимость частоты правильного выделения от отношения сигнал/шум; находились зависимости частоты правильного обнаружения объекта от частоты ложных тревог; определялось предельное отношение сигнал/шум, при котором малоразмерный объект еще обнаруживался. Под частотой правильного выделения \hat{P}_{nv} понималось отношение числа точек, правильно отнесённых к объекту, к общему количеству точек объекта. Частота ложных тревог \hat{P}_{lv} вычислялась как отношение количества точек, неверно отнесённых к объекту, к общему количеству точек изображения, не принадлежащих объекту. Частота правильного обнаружения \hat{P}_{no} малоразмерного объекта рассчитывалась как отношение числа кадров, на которых объект был обнаружен, к общему количеству кадров видеопоследовательности. Дополнительно проводились исследования точности измерения координат объектов. В качестве эталонных использовались данные, полученные человеком-экспертом.

По результатам исследований разработанных алгоритмов можно сделать следующие выводы.

1. Частота правильного выделения составляет 0,75-0,85 при частоте ложных тревог 0,005 для размеров объектов, лежащих в диапазоне от 10x10 до 50x50 элементов разрешения.
2. Частота правильного обнаружения малоразмерных воздушных объектов, наблюдаемых на фоне облачного неба при отношении сигнал/шум 3 и выше, достигает значений 0,85-0,9 при частоте ложных тревог 0,005.
3. При использовании временной обработки становится возможным уменьшить количество пропусков малоразмерного объекта при одном и том же значении ложных тревог (в 1,5-3 раза) по сравнению с чисто пространственной обработкой и заметно подавить шум. Рассматриваемые алгоритмы позволяют

обнаруживать малоразмерные объекты вплоть до отношений сигнал/шум 2,5 в исходном видеосигнале.

4. Алгоритм выделения воздушных объектов, использующий процедуру предварительной сегментации изображений, обеспечивает лучшие характеристики по сравнению с немодифицированным алгоритмом при наблюдении объектов на контрастных фонах. Прирост частоты правильного выделения составляет до 45% при фиксированной частоте ложных тревог.

5. Значение СКО ошибки измерения координат центров объектов на изображении не превышает 1,5 пикселей.

Приведены результаты исследований разработанных алгоритмов в сравнении с известными подходами, основанными на байесовской процедуре сегментации и максмедианной фильтрации, позволяющие сделать следующие выводы.

1. Анализ полученных результатов позволяет утверждать о преимуществе разработанного алгоритма выделения при наблюдении объектов размерами более 10x10 по сравнению подходом, использующим максмедианную фильтрацию. Прирост частоты правильного выделения крупноразмерного объекта составляет 30-50% при одном и том же значении ложных тревог (рисунок 3). Качество обнаружения малоразмерных объектов для рассматриваемых алгоритмов находится примерно на одинаковом уровне.

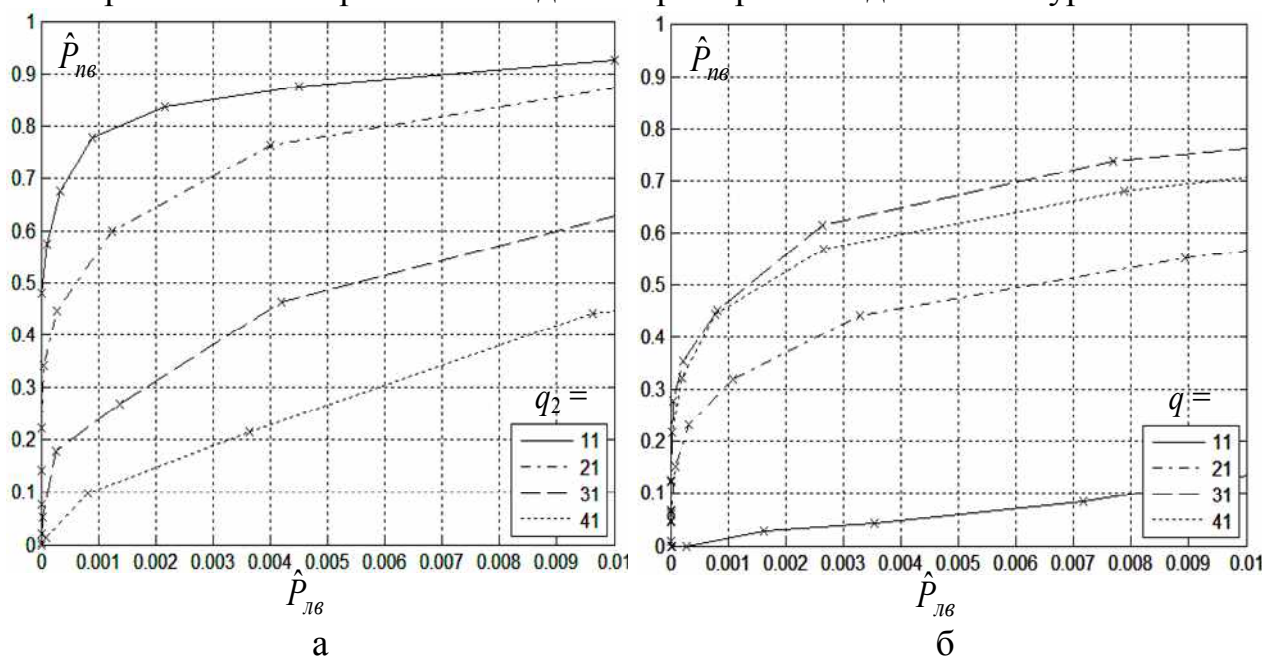


Рисунок 3 – Графики зависимостей частоты правильного выделения от частоты ложных тревог построенные при изменении k для: а- разработанного алгоритма; б- алгоритма, основанного на максмедианной фильтрации

2. Использование предлагаемого многоэтапного алгоритма выделения, обнаружения и оценки параметров воздушных объектов позволяет добиться уменьшения частоты пропусков объекта в 2 раза и СКО ошибки измерения координат центров объекта на 50-65% по сравнению с алгоритмом, основанным на байесовской сегментации. Под пропуском объекта понимается превышение расстояния, происходящее более двух кадров подряд, между эталонными и

измеренными координатами центра объекта на заранее заданную величину. В работе данная величина выбиралась равной диагонали прямоугольника, ограничивающего эталонное изображение объекта.

3. К числу основных преимуществ разработанных алгоритмов выделения воздушных объектов можно отнести: невысокую чувствительность к изменению освещенности наблюдаемой сцены, возможность обработки полного кадра изображения в реальном масштабе времени и работоспособность алгоритмов при изменении размеров объектов в большом диапазоне.

В четвёртой главе диссертации рассмотрены вопросы программной и аппаратной реализации алгоритмов выделения, обнаружения и оценки параметров объектов. Проведен анализ вычислительной сложности предложенных алгоритмов выделения воздушных объектов, позволяющий судить об их невысокой трудоемкости, даны рекомендации по аппаратной реализации алгоритмов на современной элементной базе. Описаны результаты апробации разработанных подходов в реальных условиях наблюдения, а также рассмотрены основные проблемы, выявленные в ходе проведения натурных испытаний. Приведено описание программного обеспечения, разработанного в среде MATLAB, предназначенного для моделирования алгоритмов и выполнения сравнительных экспериментальных исследований.

В работе исследовалась возможность применения предлагаемых алгоритмов выделения и оценки параметров объектов в составе пункта управления для борьбы с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), целью которого является обнаружение и сопровождение БПЛА тепловизионным датчиком и камерой видимого диапазона, а также выдача целеуказаний оператору. Помимо БПЛА на практике исследовалась эффективность обнаружения и сопровождения таких самолетов и вертолетов, как Ан-2, Миг-31, Ка-52, Ми-8 и др. на дальностях до 35 км с помощью матричных и скановых датчиков изображений. Примеры сопровождения воздушных объектов представлены на рисунке 4.

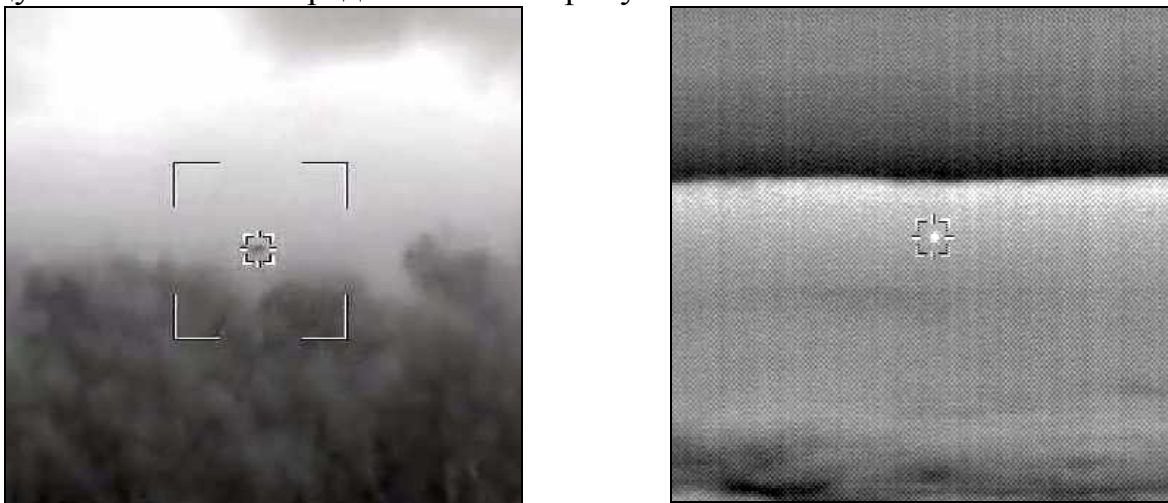


Рисунок 4 – Примеры сопровождения воздушных объектов

В процессе сопровождения возникали ситуации, характеризующиеся присутствием контрастного фона, частичным или полным заслонением объекта облаками и деревьями, изменением направления движения и размеров объекта,

искажением изображения шумами видеодатчика и низким отношением сигнал/шум во входном видеосигнале.

В целом результаты проведенных натуральных экспериментов свидетельствуют о целесообразности использования разработанных алгоритмов в составе системы автоматического сопровождения воздушных объектов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена модель фоноцелевой обстановки, на основе которой синтезирован оптимальный по критерию Неймана-Пирсона алгоритм обнаружения объектов, а также получен оптимальный по критерию максимального правдоподобия алгоритм обнаружения объектов и измерения их координат.
2. Основываясь на результатах теоретических исследований, разработан эвристический пространственно-временной алгоритм выделения воздушных объектов, наблюдаемых как на фоне ясного, так и облачного неба. Проведены сравнительные экспериментальные исследования, подтверждающие преимущества данного алгоритма по частоте правильного выделения на 30-50% при наблюдении крупноразмерных объектов по сравнению с подходом, основанным на максимедианной фильтрации.
3. Разработан алгоритм выделения воздушных объектов, использующий процедуру предварительной сегментации изображений для выявления граничных областей с резкими перепадами яркости. Данный алгоритм обеспечивает лучшие характеристики по сравнению с немодифицированным алгоритмом при наблюдении объектов на контрастных фонах (прирост частоты правильного выделения составляет до 45% при той же частоте ложных тревог).
4. С целью увеличения качества обнаружения объектов предложен двухканальный алгоритм выделения объектов, особенностями которого являются введение дополнительного канала пространственной фильтрации и пороговой обработки и использование процедуры подстройки размерности маски фильтра и порогового коэффициента.
5. Создан многоэтапный алгоритм выделения, обнаружения и оценки параметров воздушных объектов. Частота пропусков объекта при использовании разработанного подхода в среднем в 2 раза меньше, а СКО ошибки измерения координат центров объекта на 50-65% ниже по сравнению со способом, основанным на байесовской сегментации изображений.
6. Предложены методики количественной оценки эффективности работы предлагаемых алгоритмов. Проведенные экспериментальные исследования с использованием введенных мер качества позволяют утверждать о преимуществах разработанных алгоритмов по сравнению с известными ранее. Использование предлагаемых подходов в системах обработки и анализа изображений реального времени позволяет повысить точность выделения воздушных объектов, наблюдаемых на телевизионных и тепловизионных изображениях при низких отношениях сигнал/шум.
7. Выполнена оценка вычислительной сложности разработанных алгоритмов выделения объектов. Даны рекомендации по их аппаратной реализации на

современной аппаратной базе. Проведены натурные испытания комплекса алгоритмов в составе систем автоматического сопровождения воздушных объектов, установленных на ЗРК “Бук”, “Квадрат”, “Оса”, ЗРПК “Тунгуска-М1”, пункте управления ПУ-12М7 для борьбы с беспилотными летательными аппаратами, свидетельствующие о целесообразности их использования.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Муравьев В.С. Анализ траекторий движения объектов в сложных условиях наблюдения // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций. Тез. докл. 13-й междунар. научно-технич. конф. – Рязань, 2004. – С. 92-94.
2. Алпатов Б.А., Балашов О.Е., Бохан К.А., Катаев А.А., Муравьев В.С., Селяев А.А., Стротов В.В. Разработка цикла лабораторных работ по курсу “Цифровая обработка изображений” в системе MATLAB // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB. Труды 2-й всерос. научн. конф. – М.: ИПУ РАН, 2004. – С. 1825.
3. Алпатов Б.А., Муравьев В.С., Муравьев С.И. Алгоритм предварительного обнаружения объектов на основе адаптивной пороговой обработки // Сети и системы связи. Мат-лы 30-го всерос. научн. практ. сем-ра. – Рязань, РВВКУС, 2005. – С.195-197.
4. Муравьев В.С. Пространственный алгоритм обнаружения объектов на основе адаптивного порога // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций. Тез. докл. 14-й междунар. научно-техн. конф. – Рязань, 2005. – С.122-123.
5. Алпатов Б.А., Муравьев С.И., Муравьев В.С. Пространственный алгоритм выделения объектов на основе адаптивной пороговой обработки // Цифровая обработка сигналов и ее применения. Тез. докл. 8-й междунар. научно-техн. конф. Том 2. - М.: 2006. – С. 445-448.
6. Муравьев С.И., Муравьев В.С. Исследование алгоритма выделения воздушных объектов на основе пространственной фильтрации // Обработка информации в автоматических системах: Сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2006. – С. 76-82.
7. Муравьев В.С. Моделирование пространственного алгоритма обнаружения и выделения объектов в среде MATLAB // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании. Тез. докл. 11-й всерос. конф. – Рязань, 2006. – С. 136-137.
8. Муравьев С.И., Муравьев В.С. Пространственный алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов для видеоинформационных комплексов // Хранить традиции. Готовить профессионалов. Растить патриотов. Мат-лы 31-й научно-техн. конф. – Рязань, РВВКУС, 2006. – С. 148-150.
9. Муравьев В.С., Муравьев С.И. Пространственно-временной алгоритм выделения объектов, наблюдаемых на облачных фонах // Цифровая обработка сигналов и ее применения. Тез. докл. 9-й междунар. научно-техн. конф. Том 2. – М.: 2007. – С. 375-377.
10. Муравьев В.С., Муравьев С.И. Алгоритм выделения и измерения координат объектов, наблюдаемых на облачных фонах // Вестник РГРТУ. – 2007. – №21– С. 20-24.
11. Муравьев В.С. Разработка и исследование пространственно-временного алгоритма выделения воздушных объектов // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании. Тез. докл. 12-й всерос. конф. – Рязань, 2007. – С. 205.
12. Алпатов Б.А., Муравьев В.С. Пространственно-временной алгоритм выделения воздушных объектов для систем видеослежения // Сети и системы связи. Мат-лы 32-й всерос. научно-практ. конф. – Рязань, РВВКУС, 2007. – С. 5-7.
13. Муравьев В.С. Пространственно-временной алгоритм выделения объектов при космическом наблюдении // Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика. Тезисы докладов 5-й междунар. конф. – Рязань, 2007. – С. 237-239.

14. Муравьев В.С. Адаптивный пространственно-временной алгоритм выделения объектов для систем видеослежения // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций. Тез. докл. 15-й междунар. научно-технич. конф. – Рязань, 2008. – С.135-136.
15. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Муравьев В.С., Стротов В.В. Обнаружение и сопровождение объектов в последовательности изображений при наблюдении из космоса // Космос для человечества. Тез. докл. 1-ой междунар. конф. – Королев, 2008. – С. 175.
16. Муравьев В.С. Алгоритм выделения и измерения координат воздушных объектов для систем обработки изображений // Проблемы автоматизации и управления в технических системах. Тез. докл. научно-технич. конф. – Пенза, 2009. – С. 374-377.
17. Муравьев В.С. Пространственный алгоритм обнаружения и измерения координат воздушных объектов на изображении // Вестник РГРТУ. – 2009.– №28. – С. 17-20.
18. Муравьев В.С. Алгоритм выделения воздушных объектов, наблюдаемых на неоднородных фонах // Обработка информации в автоматических системах: Сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2009. – С. 83-88.

Муравьев Вадим Сергеевич

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ
ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ
ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 18.05.2010
Бумага офисная. Формат бумаги 60x84/16. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.
Печать офсетная. Заказ №

Отпечатано в ООО «Интермета»
390000, Рязань, ул. Семинарская д.3.