

СБОРНИК ТРУДОВ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ 2011

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
Р.Р. НАЗИРОВА

МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА

**МОСКВА
2012**

**Computer Vision in Control Systems 2011.
Proceedings of the Scientific-Technical Conference**

15–17 March, Tarusa, 2011. Ed. R. R. Nazirov

These are the Proceedings of the second scientific-technical conference “Computer vision in control systems 2011”. The conference was organized by the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, State Research Institute of Aviation Systems, Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences. Experts from the leading organizations both the industrial and academic research institutes as well as industry and universities participate in the conference. The reports, which are presented in the conference, reflect the major applications of computer vision in control systems — aerospace, terrestrial and underwater vehicles. The following issues of computer vision system development are considered: hardware and software, man-machine systems, methods of image analysis, objects detection and identification, image sequence analysis. The proceedings include panel reports at the conference which was held on March 15–17 in Space Research Institute, Moscow.

**Техническое зрение в системах управления 2011:
Сборник трудов научно-технической конференции**

Таруса, 15–17 марта 2011 г. Под ред. Р. Р. Назирова

Настоящий сборник содержит материалы 2-й Научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления 2011». Организаторы конференции — Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН (с 1 января 2012 г. — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)), Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ГосНИИАС), Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (с 1 января 2012 г. — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН)). В проведении конференции участвовали специалисты отраслевых и академических научно-исследовательских институтов, предприятий промышленности, а также высшей школы. На конференции были представлены доклады по применению технического зрения в системах управления авиационно-космических, наземных и подводных аппаратов. Рассматривались вопросы разработки программно-аппаратного обеспечения систем технического зрения, человеко-машинные системы, методы обработки и анализа изображений, обнаружения и идентификации объектов, анализа последовательностей. В сборник также включены секционные доклады. Конференция проходила 15–17 марта 2011 г. в ИКИ РАН, Москва.

Редакционная коллегия: *Желтов С. Ю., Назиров Р. Р., Визильтер Ю. В., Гришин В. А., Платонов А. К., Соколов С. М., Кропотов А. Н., Носков В. П., Мещеряков А. Ю., Васильев Д. В., Ким Н. В., Алатов Б. А., Костяшкин Л. Н., Антоненко Е. А.*

Редактор: *Егорова И. Н.*

Компьютерная верстка: *Комарова Н. Ю.*

Отдельные материалы даны в авторской редакции.

Содержание

Предисловие	6
-------------------	---

Секция 1

АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

<i>Егоров В. В., Ильин А. А., Калинин А. П., Родионов И. Д.</i> Гиперспектрометр как элемент цветного технического зрения	11
<i>Остриков В. Н.</i> Оценка функции рассеяния точки на произвольном снимке посредством слепого восстановления	16
<i>Остриков В. Н., Плахотников О. В., Шулика К. М.</i> Имитационная оценка потенциальных возможностей гиперспектральной съемки бортовой аппаратурой малого космического аппарата	21
<i>Васильев Д. В., Гапон А. В., Коротеев А. С., Никонов В. А.</i> Моделирование следающего дальномерного канала однокамерной системы технического зрения для космического аппарата	26
<i>Глазков В. Д., Котцов В. А.</i> Фасеточный солнечный датчик как система технического зрения для автономного управления космическим аппаратом	32
<i>Дмитриев Н. И., Хрусталева А. А., Ляпин А. И., Суворов Е. Ю.</i> Система распознавания объектов, обеспечивающая работу бортовой системы технического зрения в реальном времени	40

Секция 2

ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

<i>Выголов О. В., Визильтер Ю. В.</i> Разработка элементов авиационной системы улучшенного видения	47
<i>Бондаренко А. В., Докучаев И. В., Рода А. В., Хаджиева Я. Я.</i> Обзорно-панорамная оптико-электронная система наблюдения и обнаружения для мобильной наземной техники	50
<i>Андреев В. П., Пряничников В. Е.</i> Системы технического зрения мобильных роботов с супервизорным сетевым управлением	58
<i>Хрущ А. В., Михайлов Б. Б.</i> Управление мобильным роботом с бортовой системой объемного зрения	62
<i>Корнева Н. Н., Назаров В. Н.</i> Некоторые аспекты использования технологий стерео визуализации для космических исследований	68

Секция 3

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

<i>Андреев В. П.</i> Коррекция геометрического шума в СТЗ со сканирующей линейкой фотодатчиков методом отслеживания строк подвижного изображения	77
<i>Блажевич С. В., Винтаев В. Н., Ушакова Н. Н., Жилнев М. Ю.</i> Цифровая коррекция возмущений в изображениях, формируемых панхроматической оптико-электронной съемочной аппаратурой космического аппарата «Монитор»	83
<i>Басов И. В., Краснобаев А. А.</i> Статические способы увеличения глубины резкости оптико-цифровых регистраторов изображения	92
<i>Фаворская М. Н., Зотин А. Г., Пахирка А. И.</i> Метод улучшения цветных изображений на основе выравнивания спектральных диапазонов и коррекции контрастности	99
<i>Сторожилова М. В., Юрин Д. В.</i> Многомасштабная ранговая статистическая дифференциация: улучшение слабоконтрастных зашумленных изображений	104
<i>Ким Н. В., Коссов П. В., Михеев С. В.</i> Улучшение качества телевизионных и тепловизионных изображений	110
<i>Егоров В. В., Ильин А. А., Калинин А. П., Родионов А. И.</i> Устранение влияния динамики движения авиационного носителя на гиперспектральные изображения земной поверхности	116
<i>Фаворская М. Н., Пьянков Д. И., Горошкин А. Н.</i> Пространственно-временная коррекция видеопоследовательностей в задачах стереовидения	122
<i>Блажевич С. В., Винтаев В. Н., Селютина Е. С., Ушакова Н. Н.</i> Синтез цифровых изображений субпиксельного уровня разрешения с использованием расфокусировки	127
<i>Сомов Е. И., Бутырин С. А.</i> Комплексирование наблюдательной и навигационной информации для верификации работы системы управления спутника и улучшения измерительных свойств космических снимков	138
<i>А. Ю. Рубис, О. В. Выголов, Ю. В. Визильтер</i> Морфологическое комплексирование изображений различных спектральных диапазонов	143

Секция 4

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

<i>Левашов А. Е., Юрин Д. В.</i> Поиск параметрических кривых на изображениях	151
<i>Кий К. И.</i> Структурный граф цветовых сгустков: структуры контрастов и их применение . . .	157
<i>Визильтер Ю. В., Горбачевич В. С.</i> Описание формы объектов на изображениях при помощи гибких структурирующих элементов	162
<i>Дорогов А. Ю.</i> Теоретические основы обучаемых алгоритмов быстрых преобразований.	168
<i>Карташев В. А., Карташев В. В.</i> Туннельный микроскоп как система технического зрения для визуализации нанорельефа поверхности	174

Секция 5
ОБНАРУЖЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

<i>Блохинов Ю. Б., Чернявский А. С.</i> Поиск трехмерных объектов на изображениях на основе динамически формируемых контурных эталонов	181
<i>Комаров Д. В., Визильтер Ю. В., Выголов О. В.</i> Разработка алгоритма автоматического обнаружения взлетно-посадочной полосы на видеоизображениях	189
<i>Липатов А. Н., Ляш А. Н., Макаров В. С., Антоненко С. А., Захаркин Г. В.</i> Техническое зрение для системы автоматической посадки в морской среде	195
<i>Жуков Б. С., Жуков С. Б.</i> Отработка алгоритма автономного выбора места посадки космического аппарата «Фобос-Грунт» по телевизионным изображениям	203
<i>Ким Н. В., Кузнецов А. Г.</i> Поиск объектов на основе анализа наблюдаемой ситуации	209
<i>Корнилов Ф. А., Костоусов К. В., Первалов Д. С.</i> Применение алгоритма Виолы – Джонса с двухточечными признаками для поиска антропогенных объектов в траве.	214

Секция 6
АНАЛИЗ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ
И ДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

<i>Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б.</i> Система технического зрения для измерения пути мобильного робота	219
<i>Гришин В. А.</i> Анализ влияния конструктивно-технологического разброса углового и линейного положения камер, а также асинхронности съемки на характеристики алгоритмов обработки изображений в стереорежиме	225
<i>Алпатов Б. А., Фельдман А. Б.</i> Измерение координат объекта в видеопоследовательности с использованием оценки фонового изображения	231

Предисловие

Настоящий сборник содержит материалы 2-й Научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления 2011» (ТЗСУ-2011), проходившей 15–17 марта 2011 г. в Учреждении Российской академии наук Институте космических исследований РАН (с 1 января 2012 года — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)), Москва. Организаторы конференции — ИКИ РАН, Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС) и Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (с 1 января 2012 г. — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН)). В проведении конференции участвовали специалисты отраслевых и академических научно-исследовательских институтов, предприятий промышленности, а также высшей школы.

Тематика компьютерного зрения и автоматического анализа изображений — сегодня предмет интенсивных научных исследований как в нашей стране, так и за рубежом. Ежегодно проводится значительное количество разнообразных семинаров и конференций, посвященных разработкам в этой области. Среди российских можно выделить такие известные и популярные конференции как «Математические методы распознавания образов» (ММРО), “Pattern Recognition and Image Analysis” (PRIA), «Интеллектуальная обработка информации» (ИОИ), Graphicon и ряд других. Тем не менее, как показал опыт проведения конференции-семинара «Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010», она представляется в достаточной степени полезной и востребованной, поскольку, удачно дополняя спектр подобных мероприятий, занимает некую свою, особую и до сих пор пустовавшую нишу. Эта ниша определяется общей нацеленностью на практические приложения и специфическими требованиями, которые предъявляются не только к методам и алгоритмам обработки информации, но и, в не меньшей степени, к аппаратным и программным средствам технического зрения в системах управления. При этом особое внимание уделяется бортовым системам технического зрения, входящим в состав мобильных объектов и предназначенным для решения задач автономного и автоматизированного управления в сложной, неопределенной и быстро меняющейся внешней обстановке. Под мобильными объектами здесь понимаются авиационные и космические летательные аппараты, наземные, надводные и подводные транспортные средства, а также роботы различных классов и назначения.

Тематика конференции охватывает разнообразные аспекты разработки и построения подсистем технического зрения в системах управления.

Вопросы построения архитектуры бортовых систем технического зрения включают основные требования к ним, аппаратное (вычислители, датчики, оптика, каналы передачи данных) и программно-алгоритмическое обеспечение,

способы повышения быстродействия алгоритмов, реализацию параллельных вычислений.

Информационное обеспечение процессов управления средствами технического зрения предполагает автономную навигацию и ориентацию в окружающей среде, автоматическое обнаружение, распознавание и сопровождение объектов в реальном времени, маневрирование на основе визуальной информации (выбор маршрута движения, обнаружение препятствий, стабилизацию, посадку, стыковку и др.).

Информационное обеспечение бортовых систем включает способы: представления и хранения геоинформационных данных, образов объектов, ориентиров и т. п.; подготовки исходных данных, включая создание цифровых моделей местности, ортофотопланов, мозаик, панорамных изображений; использования априорных данных в бортовых системах, а также их телеметрического обеспечения.

Проблемы технического зрения связаны с обеспечением устойчивости алгоритмов анализа изображений к условиям ограниченной видимости, наличию искажений, помех и противодействия, а также к яркостно-геометрической изменчивости наблюдаемых объектов и сцен, определяемой не только изменением условий, ракурсов и дальности наблюдения, но и собственной изменчивостью наблюдаемых объектов.

Важную группу проблем составляют вопросы взаимодействия систем технического зрения с системами управления, прежде всего, в контурах управления движением. Необходимо обеспечить устойчивость управления при сбоях в системах технического зрения, исследовать влияние динамики движения мобильных объектов на решение их задач. Актуальными считаются вопросы получения, моделирования и использования трехмерных данных в задачах управления, комплексирования видеоинформации с информацией от датчиков других типов (гироскопов, акселерометров и т. п.). Особый круг вопросов связан с техническим зрением в системах автономного искусственного интеллекта мобильных объектов.

Много интересных задач возникает при использовании в системах технического зрения различных типов двумерных сенсоров. Это задачи цветного зрения, получения и комплексного анализа изображений различной физической природы (телевизионной, инфракрасной, ультрафиолетовой, радиолокационной и др.), совместной обработки и комплексирования многозональных и многоспектральных изображений, дальнометрического трехмерного зрения, стерео и многокамерного зрения. К этой группе можно отнести и проблемы построения систем активного зрения, предполагающего адаптивное управление зрительными сенсорами.

Специфические требования определяют необходимость модификации известных и разработки новых математических методов обработки и анализа изображений, включая такие классические задачи как фильтрация и улучшение изображений, их сегментация, текстурный анализ, анализ формы (морфологический анализ), сравнение и привязка (*matching*) изображений, зрение на основе моделей и т. п. Обучение, самообучение и распознавание в задачах технического зрения представляет собой специфический раздел современного машинного обучения.

В последние годы все большую роль играют задачи синтезированного и улучшенного видения в человеко-машинных системах управления автономных технических объектов. Они применяются в условиях ограниченной видимости, неполной или неактуальной визуальной информации, поступающей по обычным

визуальным каналам операторам (летчикам, водителям), принимающим решения по управлению теми или иными мобильными аппаратами, роботами, боевой техникой или транспортными средствами. Кроме собственно обработки изображений здесь востребованы технологии синтеза и моделирования пространственных сцен, специализированные аппаратные и программные средства (специализированные бортовые индикаторы, графические вычислители и т. п.).

Доклады участников конференции ТЗСУ-2011 были сгруппированы по секциям, связанным в основном с различными типами решаемых прикладных задач. Секция 1 была посвящена аппаратному обеспечению систем технического зрения — характеристикам датчиков и вычислителей. В секции 2 рассматривались человеко-машинные системы технического зрения: авиационные системы улучшенного видения, обзорно-панорамные системы наблюдения и обнаружения для мобильной наземной техники, системы зрения мобильных роботов с телеуправлением. Секция 3 была посвящена решению задач низкоуровневой обработки изображений в системах технического зрения: коррекции шума, улучшению изображений, устранению влияния динамики движения, комплексированию видеоинформации. В секции 4 рассматривались математические методы анализа изображений среднего уровня — поиск параметрических кривых, анализ формы и цвета. Секция 5 включала вопросы обнаружения и идентификации объектов в системах технического зрения. Секция 6 была посвящена анализу видеопоследовательностей и динамических факторов.

Представленные доклады в целом достаточно адекватно отражают проблематику и современный уровень развития рассматриваемой научно-технической области. Мы надеемся, что знакомство со сборником трудов конференции ТЗСУ-2011 окажется полезным для широкого круга практических специалистов, занятых созданием, внедрением и эксплуатацией систем технического зрения.

Ю. В. Визильтер
начальник лаборатории ФГУП «ГосНИИАС»

Секция 1

АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

ГИПЕРСПЕКТРОМЕТР КАК ЭЛЕМЕНТ ЦВЕТНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

В. В. Егоров¹, А. А. Ильин², А. П. Калинин³, И. Д. Родионов⁴

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки *Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва*

² *Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр «Реагент», (ЗАО НТЦ «Реагент»), Москва*

³ *Учреждение Российской академии наук Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), Москва*

⁴ *Учреждение Российской академии наук Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН (ИХФ РАН), Москва*

Интеллектуальность систем управления связана с получением цветовой (спектральной) картины зондируемого объекта и возможности принятия управленческих решений на этой основе. Обсуждаются проблемы получения пространственно-спектральной (цветовой) картины изображения с помощью гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования. Показано, что гиперспектрометр действительно может быть элементом цветного технического зрения в системах управления.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям.

Ключевые слова: гиперспектрометр, излучение, спектр, цветное зрение, изображение, дистанционное зондирование, мониторинг, управление.

Цель технического цветного (или просто цветового) зрения — воспринимать испускаемое или отраженное световое излучение и дифференцировать его по длине волны. В настоящее время только гиперспектральный сенсор — именно тот прибор технического цветного зрения, который в полной мере соответствует этому определению. Гиперспектрометр во многом превосходит глаз по возможностям цветного зрения (по спектральному и пространственному разрешению, возможности регистрации интенсивности, чувствительностью к ультрафиолетовой и инфракрасной частям излучения и к поляризации).

В совокупности с экспертной системой (базой знаний) гиперспектрометр можно считать прибором, обладающим свойствами интеллектуального зрения. Техническое зрение — важный составляющий элемент искусственных интеллектуальных систем, используемых в задачах управления. Например при тушении лесных пожаров, ликвидации последствий природных и техногенных катастроф, проведении агротехнических мероприятий в сельском хозяйстве, обнаружения несанкционированных наркосодержащих культур и т. п.

В значительной степени интеллектуальность систем управления связана с их способностью восприятия как трехмерной картины окружающего мира, так и получения цветовой (спектральной) картины об этом мире, а также поддержки управленческих решений.

Егоров Виктор Валентинович — старший научный сотрудник, кандидат технических наук, e-mail: victor_egorov@mail.ru.

Ильин Андрей Александрович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: andreyilyn@mail.ru.

Калинин Александр Петрович — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, e-mail: kalinin@ipmnet.ru.

Родионов Игорь Дмитриевич — заведующий лабораторией, старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук, e-mail: irodionov@reagent-rdc.ru.

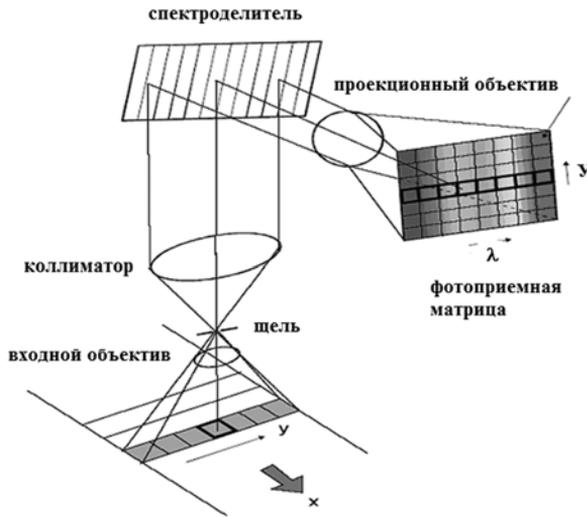


Рис. 1. Функциональная схема гиперспектрометра типа pushbroom

В настоящей работе обсуждаются проблемы получения пространственно-спектральной картины изображения с помощью гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования.

Функциональная схема гиперспектрометра типа pushbroom показана на рис. 1. Как правило, гиперспектрометр включает в себя оптическую систему формирования изображения, спектроделитель и фотоприемное устройство. Подробное описание гиперспектрометра и его функционирования можно найти в работе [Калинин и др., 2006].

В результате проведения гиперспектральной съемки объекта дистанционного зондирования формируется так называемый «гиперкуб» (рис. 2). В плоскости ХОУ формируется пространственное изображение зондируемого объекта, для каждого пиксела которого существует развертка по длине волны λ (цветовая информация).

Кроме трех указанных координат, к ним может добавляться и поляризационная координата. Таким образом, измеряемые гиперспектрометром данные представляют собой значения функции, заданной в многомерном пространстве.

Результаты гиперспектральных измерений особенно полезны для решения сложных задач обнаружения объектов, идентификации их состава, проходящих в них процессов, выделения отличий между очень близкими классами предметов, оценки биохимических и геофизических параметров и т. п., результаты которых широко используются в мониторинге и управлении состоянием объекта.

В ЗАО НТЦ «Реагент» была создана серия гиперспектрометров, которые

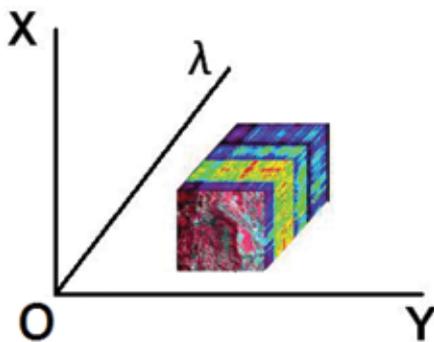


Рис. 2. Гиперкуб

использовались в лабораторных и натуральных экспериментах по изучению кинетики процессов горения и взрыва, определению целевого типа растительности (например, наркосодержащих культур) на фоне других ценозов, исследованию биохимического состава растительности и т. п. Приведем примеры практического использования спектральных данных, представляющих интерес в принятии управленческих решений.

На рис. 3 показано авиационное гиперспектральное изображение участка тундры с грунтовой дорогой и газопроводной трассой. На нем наглядно отображаются процессы эрозии почвы, приведшие к оголению трубы газопровода. Эта информация может быть использована в управлении восстановительными работами на газопроводной трассе.

На рис. 4 — участок реки, на котором работает земснаряд 1. Цифрой 2 отмечен алюминиевый бакен. Проточная незамутненная вода помечена цифрой 3, замутненная в результате работы земснаряда вода — цифрой 4. Этот рисунок наглядно демонстрирует возможности гиперспектральной съемки для отслеживания ситуации на речной акватории при углублении русла реки. Получаемая в результате тематической обработки карта акватории может быть использована для выработки решений по управлению работой земснаряда. Данные съемки гиперспектрального цветного зрения найдут применение и для решения экологических проблем, связанных, например, с загрязнением воды нефтепродуктами, смывом удобрений с полей и т. п.

Рисунок 5 демонстрирует возможности цветного технического зрения для задач, связанных с распознаванием сельскохозяйственных культур с целью принятия управленческих решений [Родионов, 2010]. На рис. 5а красным прямоугольником выделен опытный участок с делянками различных культур (см. увеличенный фрагмент), используемый для процедуры обучения и последующего распознавания на рабочих участках. На рис. 5в — результаты тематической обработки гиперспектральных данных: распознавания сельскохозяйственных культур

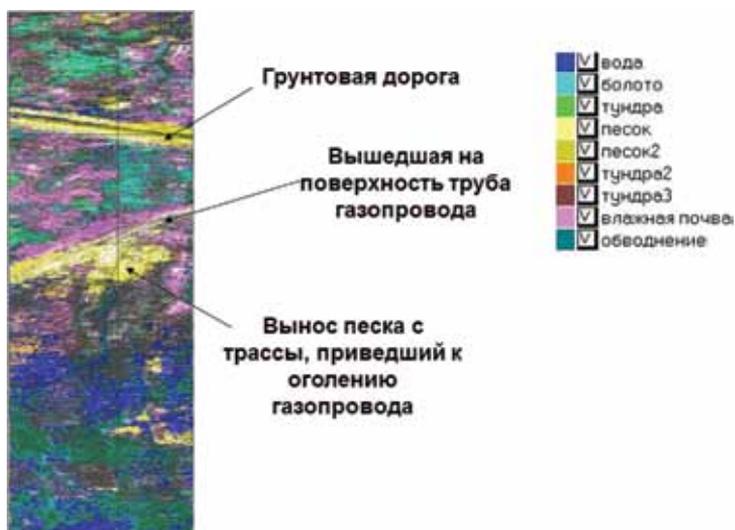


Рис. 3. Пример использования гиперспектральных данных в задачах мониторинга состояния газопроводов

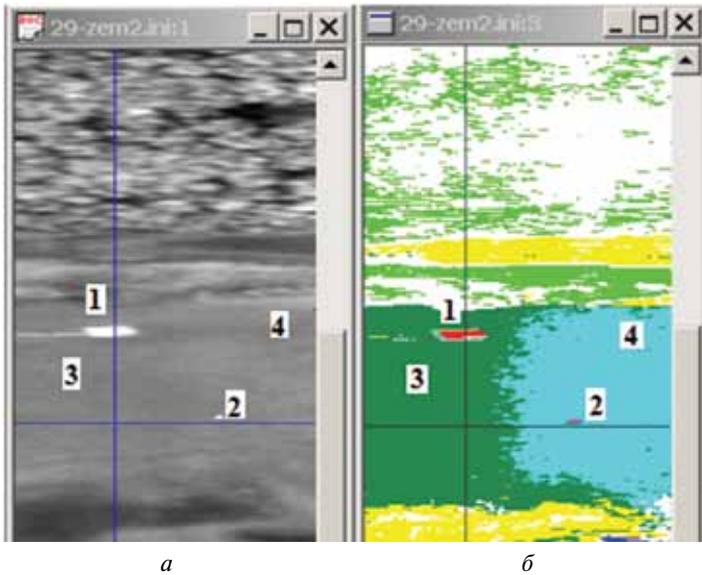


Рис. 4. Пример использования гиперспектральных данных для мониторинга экологического состояния речной акватории, связанного с работой земснаряда: *а* — гиперспектральное изображение акватории для длины волны 537 нм; *б* — результат тематической обработки гиперспектральной информации

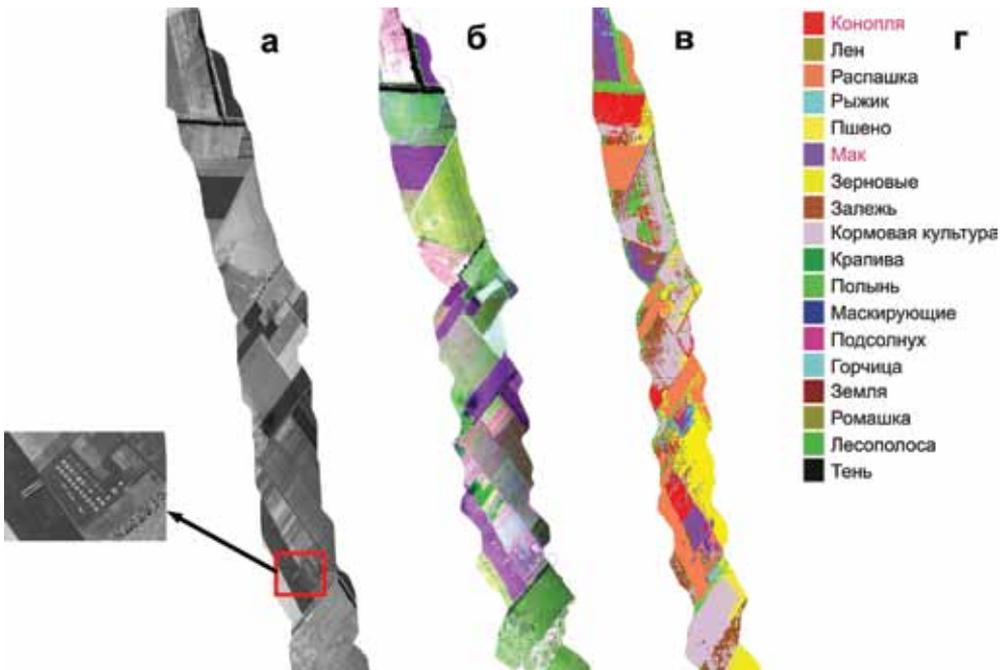


Рис. 5. Результаты авиационной гиперспектральной съемки сельскохозяйственного региона: *а* — видеосъемка; *б* — RGB-гиперспектральное изображение; *в* — пример тематической обработки гиперспектральных данных; *г* — легенда

по трассе съемки, расшифровка классов которых приведена на рис. 5г. Эти материалы представляют интерес, в частности, для служб контроля за несанкционированными посадками наркосодержащих растений (конопля, мак).

В заключение отметим, что гиперспектрометр представляется эффективным инструментом цветного технического зрения, позволяющим проводить мониторинг состояния различных природных образований и техногенных объектов. Данные такого мониторинга могут эффективно использоваться в системах поддержки принятия управленческих решений в экологии, сельском хозяйстве, при возникновении чрезвычайных ситуаций (пожары, наводнения, извержения вулканов, техногенные катастрофы) и т. п.

Литература

- [Калинин и др., 2006] Калинин А. П., Орлов А. Г., Родионов И. Д. Авиационный гиперспектрометр // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2006. № 3. С. 11–24.
[Родионов, 2010] Родионов И. Д. Авиационный гиперспектральный мониторинг посевов наркосодержащих культур // Аэрокосм. курьер. 2010. № 6. С. 32–33.

HYPERSPECTROMETER AS AN ELEMENT OF COLOR TECHNICAL VISION

V. V. Egorov¹, A. A. Ilyin², A. P. Kalinin³, I. D. Rodionov⁴

¹ Space Research Institute (IKI RAN), Moscow

² Stock Company, Reagent Scientific Engineering Centre (R&D “Reagent”), Moscow

³ Ishlinsky Institute of Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences
(IPMech RAS), Moscow

⁴ Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences
(IChPh RAS), Moscow

Control system intellectuality is connected with the receipt of color (spectral) image of sensed object and capability to adopt the control decision on that base. The problems of getting spatial and spectral (color) image by sounding hyperspectrometer is discussed. It is shown that the hyperspectrometer really is the element of color technical vision in control systems.

Keywords: hyperspectrometer, radiation, spectrum, color vision, remote sensing, monitoring, control.

Egorov Victor Valentinovich — senior researcher, candidate of science, e-mail: victor_egorov@mail.ru.

Ilyin Andrey Alexandrovich — senior researcher, candidate of science, e-mail: andreyilyin@mail.ru.

Kalinin Alexander Petrovich — leading researcher, PhD, senior researcher, e-mail: kalinin@ipmnet.ru.

Rodionov Igor Dmitrievich — chief of laboratory, PhD, e-mail: irodionov@reagent-rdc.ru.

ОЦЕНКА ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ ТОЧКИ НА ПРОИЗВОЛЬНОМ СНИМКЕ ПОСРЕДСТВОМ СЛЕПОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

В. Н. Остриков

*Санкт-Петербургский филиал ОАО «Конструкторское бюро «Луч»
(СПбФ ОАО «КБ «Луч»), Санкт-Петербург*

Разработана технология слепого восстановления для оценки функции рассеяния точки. Фрагмент снимка восстанавливается по Тихонову с выбором параметров фазовых возмущений на основе оптимизации по минимуму энтропии.

Ключевые слова: функция рассеяния точки, качество оптических изображений, слепое восстановление.

Оценка функции рассеяния точки (ФРТ) по результирующему снимку — одна из актуальных задач применительно к различным проблемам, возникающим в процессе разработки и эксплуатации средств технического зрения оптического диапазона. Наиболее часто реализуемый подход к оценке ФРТ — ее определение по локальной функции рассеяния края или расчет по априорно известному простому объекту на равномерном фоне [Smirnov et al., 1996; Остриков, Плахотников, 2006]. Однако не всегда и не на любом снимке удается выделить необходимые участки.

В последние десятилетия получила развитие относительно новая технология обработки сигналов — так называемое слепое восстановление [Kundur, Nitzinakos, 1996]. В 1994 г. [Comon, 1994] было теоретически строго показано, если наблюдаемый процесс связан линейным преобразованием с некоторым исходным образом, могут быть одновременно получены оценки, как процесса, так и ядра преобразования на основе аппарата слепого восстановления при условии, что наблюдаемое распределение отличается от нормального. В настоящей статье предложен метод определения функции рассеяния точки по произвольному вырезу снимка на основе технологии слепого восстановления изображений по критерию минимума энтропии.

Известно, что для линейных систем процесс формирования снимка формально записывается в виде интегрального уравнения Фредгольма первого рода типа свертки исходного энергетического портрета f , определяемого отображаемым сюжетом, и локальной ФРТ h . Модель формирования можно записать в дискретной форме [Гудмен, 1988]:

$$g = \Phi_2^{-1}\{\Phi_2\{f\} \Phi_2\{h\}\}, \quad (1)$$

где $\Phi_2\{\cdot\}$, $\Phi_2^{-1}\{\cdot\}$ — соответственно прямое и обратное двумерное преобразование Фурье, $f = f_{ij}$; $h = h_{ij}$; $i = 0, 1, \dots, N-1$; $j = 0, 1, \dots, M-1$; N, M — размерности исходного фрагмента по соответствующим координатам.

Для решения в частотной области задачи, обратной (1) (с учетом ее некорректности), для оценки $\tilde{F}(\omega_i, \omega_j)$ часто используется алгоритм Тихонова [Василенко, Тараторин, 1986]:

Остриков Вадим Николаевич — главный научный сотрудник, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: ostrvad@mail.ru.

$$\tilde{F}(\omega_i, \omega_j) = \frac{H^*(\omega_i, \omega_j) G(\omega_i, \omega_j)}{|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \alpha \sqrt{\omega_i^2 + \omega_j^2}} = H^{-1} G, \quad (2)$$

где $H(\omega_i, \omega_j) = \Phi_2\{h_{ij}\}$; $G(\omega_i, \omega_j) = \Phi_2\{g_{ij}\}$; α — коэффициент регуляризации, зависящий от уровня шума на фрагменте, H^{-1} — обратный оператор (восстановления).

При этом функция рассеяния точки h_{ij} связана через преобразование Фурье с функцией зрачка p_{ij} . Переходя к полярным координатам, можно записать

$$h(\rho, \varphi) = (\Phi_2\{p(\rho, \varphi)\})^2, \quad (3)$$

где $p(\rho, \varphi) = A(\rho, \varphi) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} w(\rho, \varphi)\right]$ — функция зрачка; $A(\rho, \varphi)$ — амплитудное пропускание апертуры; $w(\rho, \varphi)$ — фазовая функция, λ — средняя длина волны на интервале чувствительности прибора.

Обычно амплитудная функция пропускания оптики известна, положим $A(\rho, \varphi) \equiv 1$ при $\rho \leq 1$, тогда функция зрачка определяется только фазовой функцией. Представим ее в виде конечного разложения в ряд полиномов Цернике, ортогональных на круге [Воронцов, Шмальгаузен, 1985]

$$w(\rho, \varphi) = \sum_{k=0}^K s_k z_k(\rho, \varphi), \quad (4)$$

где $z_k(\rho, \varphi)$ — k -й полином Цернике; $s = [s_0, s_1, \dots, s_{K-1}]$ — вектор-набор скалярных коэффициентов фазовых возмущений. Шесть первых полиномов Цернике имеют вид: $z_0 = 1$; $z_1(\rho, \varphi) = 2\rho \cos\varphi$; $z_2(\rho, \varphi) = 2\rho \sin\varphi$; $z_3(\rho, \varphi) = \sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$; $z_4(\rho, \varphi) = \sqrt{6} \cdot \rho^2 \sin 2\varphi$; $z_5(\rho, \varphi) = \sqrt{6} \cdot \rho^2 \sin 2\varphi$. При выборе границ $\rho \in [0, \rho_{\max}]$, $\varphi \in [0, 2\pi)$, $w(s, \rho, \varphi) \equiv w(s)$ (равна нулю вне границ) фазовая функция возмущений задана набором коэффициентов. Тогда функция рассеяния точки, равно как и вид обратного оператора, полностью определены оценкой вектора \tilde{s} : $\tilde{h}(\rho, \varphi) \equiv \tilde{h}(\tilde{s})$, $H^{-1} \equiv H^{-1}(\tilde{s})$.

Из современной теории методов слепой обработки сигналов следует [Comon, 1994], что если отсчеты образа f_{ij} независимы и имеют негауссово распределение, то найдется такая вещественная функция $q(f)$ (контрастная функция), стохастическая минимизация которой обеспечивает в среднем однозначное решение задачи слепого восстановления (2). Как было отмечено [Горячкин, 2003], применительно к радиолокационным изображениям и сигналам в радиотехнике и связи, функционалом качества может также выступать энтропия восстанавливаемого изображения $Q = E(\tilde{f})$, при контрастной функции $q(\tilde{f}) = \log(p_{\tilde{f}}(\tilde{f}))$. С учетом (1)–(4), алгоритм слепого восстановления можно записать в обобщенном виде

$$\tilde{F} = \arg\{\max_{H^{-1}}[\tilde{E}(H^{-1}G)]\} G, \quad (5)$$

где энтропия восстанавливаемого образа

$$\tilde{E}(\tilde{f}) = - \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} \tilde{p}(\tilde{f}_{ij}) \log[\tilde{p}(\tilde{f}_{ij})]. \quad (6)$$

При этом оценка вероятностей отсчетов $\tilde{p}(f)$ строится либо на основе его гистограммы, либо с использованием скользящего окна [Дуда, Харт, 1976]. Таким образом, последовательный перебор пробных восстановлений (2) для априорно заданной размерности K , позволяет, при выполнении условия (5), однозначно оценивать функцию рассеяния точки $\tilde{h}(\rho, \varphi) \equiv h(\tilde{s})$. Важное обстоятельство, существенно облегчающее вычислительную реализацию рассмотренного метода, — фактическая независимость поиска обратного оператора по компонентам s , что было подтверждено эмпирически [Воронцов, Шмальгаузен, 1985].

Реализация пробных восстановлений (1) требует знания коэффициента регуляризации α , для этого предварительно на фрагменте g оценивается уровень случайного шума [Шовенгердт, 2010]. Выбор параметра регуляризации заранее определяется в ходе тестового моделирования. Качество восстановления контролируется среднеквадратической близостью восстановленного образа к энергетическому портрету.

На рис. 1 приведен пример модельного синтеза изображения, на основе которого проводились оценки зависимости параметра регуляризации. Синтез размытия выполнялся на основе полиномиального разложения фазовых возмущений [Сокольский, 1988], отличающегося от (3). На имитационной модели оценивалась точность определения ФРТ с использованием разработанного алгоритма. На рис. 1 приведены результаты моделирования объекта и тестовой миры.

Моделирование показало, что разработанный метод позволяет оценивать ФРТ снимков, характерных для аппаратуры воздушной и космической съемки. При этом точность расчета ФРТ определяется ошибкой в диапазоне $\pm 5...10\%$ по коэффициенту Штреля [Сокольский, 1988] для шести оцениваемых составляющих вектора s .

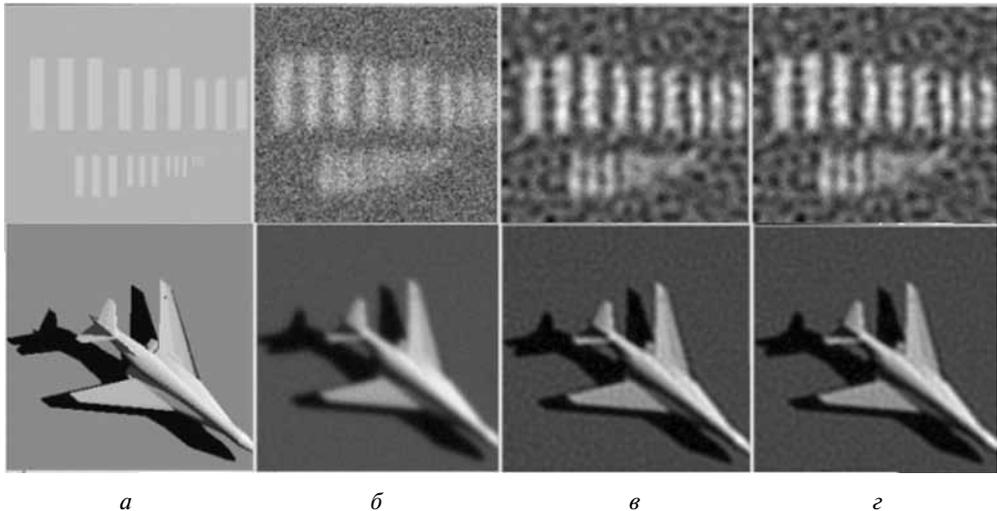


Рис. 1. Результаты моделирования объекта (внизу) и тестовой миры (вверху): *a* — исходный энергетический портрет; *б* — синтезированный образ с размытием и наложенным аддитивным шумом; *в* — восстановление по априорно известной ФРТ; *г* — восстановление разработанным методом

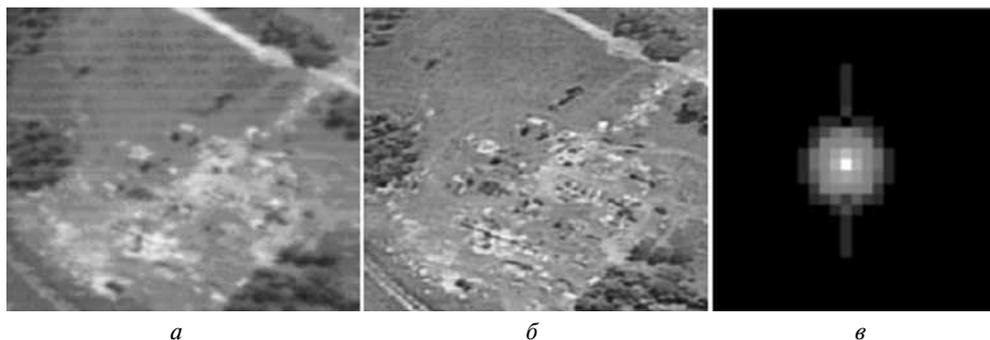


Рис. 2. Результат обработки авиационного снимка: *а* — исходный фрагмент; *б* — предварительно обработанный и восстановленный; *в* — рассчитанная функция рассеяния точки (увеличенная)

На рис. 2 приведен пример восстановления фрагмента авиационного снимка разработанным методом. Предварительно компенсировались регулярные шумы [Остриков, 2007]. Пример демонстрирует существенное повышение конечного качества обработки. Время, затраченное на получение оценки шести составляющих вектора фазовых возмущений, составило 30 с при размерности тестового фрагмента 128×128 пикселей (процессор с тактовой частотой 1700 МГц).

Таким образом, на основе реализованной и апробированной на большой выборке (сотни различных снимков) технологии расчёта ФРТ можно оценивать качество изображений, повышать локальное разрешение, решать другие прикладные задачи.

Литература

- [Василенко, Тараторин, 1986] *Василенко Г. И., Тараторин А. М.* Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. 302 с.
- [Воронцов, Шмальгаузен, 1985] *Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И.* Принципы адаптивной оптики. М: Наука, 1985. 335 с.
- [Горячкин, 2003] *Горячкин О. В.* Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи (2003). М.: Радио и связь, 2003. 230 с.
- [Гудмен, 1988] *Гудмен Д.* Статистическая оптика. М.: Мир, 1988. 527 с.
- [Дуда, Харт, 1976] *Дуда Р., Харт П.* Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 511 с.
- [Остриков, 2007] *Остриков В. Н.* Логико-алгебраический подход к построению адаптивной радиометрической коррекции полосовых шумов видеоданных // *Фундаментальные исслед. и инновации в техн. ун-тах. Национальная безопасность: Материалы 11-й Всерос. конф. по проблемам науки и высшей шк.* Санкт-Петербург, 18–19 мая 2007. СПб.: СПбГТУ, 2007. С. 227–232.
- [Остриков, Плахотников, 2006] *Остриков В. Н., Плахотников О. В.* Идентификация функции рассеяния точки канала наблюдения по калибрующему изображению посредством метода наименьших квадратов // *Оптич. журн.* 2006. Т. 73. № 2. С. 26–30.
- [Сокольский, 1988] *Сокольский М. Н.* Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1988. 181 с.
- [Шовенгердт, 2010] *Шовенгердт Р. А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

- [Comon, 1994] *Comon P.* Independent Component Analysis, a New Concept? // *Signal Processing*. 1994. V. 4. № 36. P. 287–314.
- [Kundur, Hatzinakos, 1996] *Kundur D., Hatzinakos D.* Blind image deconvolution: An algorithmic approach to practical image restoration // *IEEE Signal Processing Magazine*. 1996. N. 4. P. 1–42.
- [Smirnov et al., 1996] *Smirnov M. V., Korolev A. N., Sivjakov I. N., Zvezdin D. I.* Method and Software of Automatic Resolution Evaluating of Optic-Electronic Telescopic Land Remote Sensing System // *AeroSense'96 Symp. Visual Information Processing V.* April 1996, Orlando, USA: Proc. SPIE. 1996. V. 2753. P. 231–238.

BLIND IMAGE DECONVOLUTION FOR POINT SPREAD FUNCTION ESTIMATION

V. N. Ostrikov

Joint-Stock Company "Luch", Saint-Petersburg

The blind image deconvolution techniques for point spread function estimation was developed. The algorithm restores the image and the point-spread function simultaneously with the help of Tikhonov deblurring method. Techniques bases on phase disturbance selection by entropy minimization.

Keywords: point spread function, image quality, entropy minimization.

Ostrikov Vadim Nikolaevich — master of science, PhD, senior scientist, e-mail: ostrvad@mail.ru.

ИМИТАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРОЙ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В. Н. Остриков, О. В. Плахотников, К. М. Шулика

*Санкт-Петербургский филиал ОАО «Конструкторское бюро «Луч»
(СПбФ ОАО «КБ «Луч»), Санкт-Петербург*

Описываются результаты, относящиеся к использованию бортовых гиперспектральных датчиков на малых космических аппаратах. Проведен анализ возможностей системы с помощью имитационной модели гиперспектральных данных, прошедших тракт объект – снимок. Получены оценки бинарного разделения пары объект – фон субпиксельным методом.

Ключевые слова: гиперспектральная съемка, имитационное моделирование, спектральное распознавание.

В течение последних двух десятилетий за рубежом для решения ряда прикладных задач широко используются материалы видового обзора, формируемые аппаратурой гиперспектральной съемки (ГСС). Основная причина применения ГСС связана с возможностью существенного повышения эффективности выделения и распознавания объектов интереса в сочетании со сравнительно низким пространственным разрешением. Вместе с тем, для обоснованного выбора параметров аппаратуры, включая отработку методов спектральной идентификации, используются имитационные модели.

Предлагаемая модель разработана для оценки возможностей бортовых видеоспектрометров космического и воздушного базирования применительно к различным условиям проведения съемки и исходной фоно-целевой обстановки. В качестве альтернативы выступают два варианта — искомый объект и фон. Для имитационного решения задачи спектрального дешифрирования используются данные об анализируемых сценах, сформированные по ранее проведенным измерениям.

Основной входной элемент модели — синтез пространственно-спектрального распределения сюжета (модель фоно-целевой обстановки) в виде синтезированного спектрального «куба», с векторными значениями коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в каждом пикселе. В данном случае в заданном спектральном диапазоне 0,4...1,0 мкм, с шагом в 1 нм. Спектральные характеристики для моделирования берутся из набора (имеющейся базы) спектральных данных, полученных либо наземными измерениями ручным спектрометром, типа FieldSpec, либо в ходе обработки данных воздушной съемки (с учетом наземной калибровки и пересчета полученных видеоданных в распределение КСЯ). Смысловая часть модели представляет собой вычислительное преобразование исходного распределения КСЯ в видеосигналы с заданным спектральным

Остриков Вадим Николаевич — главный научный сотрудник, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: ostrvad@mail.ru.

Плахотников Олег Владимирович — начальник отдела, кандидат технических наук, e-mail: oleg-vl@yandex.ru.

Шулика Константин Михайлович — заместитель директора по НИОКР, старший научный сотрудник, кандидат технических наук, e-mail: shulken@yandex.ru.

разрешением, в зависимости от введенного набора характеристик тракта формирования. При этом используются параметры условий наблюдения с учетом пространственного размытия тракта наблюдения и присутствующего шума. После обратного преобразования сигналов, в ходе имитации калибровки, в пространственное модельное распределение КСЯ, выходные данные бинарно классифицируются субпиксельным методом. На конечном этапе рассчитывается потенциальная вероятность спектрального различения исследуемой пары объект – фон.

В рассматриваемой модели в поле зрения имитируемого спектрального канала попадают от 8×8 до 16×16 элементарных элементов разрешения, соответствующих присутствию «объектов» на моделируемом фоне. Синтез спектрального «куба» данных определяется видом текущего пространственного шаблона. При этом выражение для генерации элементов $\rho_{ij}(\lambda)$

$$\rho_{ij}(\lambda) = \begin{cases} \rho_{Go}(\lambda) F_o(\xi_{ij}) + [1 - F_o(\xi_{ij})] \rho_{Mo}(\lambda), & ij \in o, \\ \rho_{Gf}(\lambda) F_f(\xi_{ij}) + [1 - F_f(\xi_{ij})] \rho_{Mf}(\lambda), & ij \in f, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ_{Go} , ρ_{Mo} и ρ_{Gf} , ρ_{Mf} — соответственно верхняя и нижняя границы экспериментально измеренных кривых, ограничивающих реально наблюдаемые случайные распределения КСЯ по объекту F_o и фону F_f .

Для оценки влияния аппаратуры и тракта наблюдения спектральные ходы пространственного распределения пересчитываются в сигналы приемного устройства, сначала без влияния пространственного размытия. Для этого преобразование распределения КСЯ $\rho_{ij}(\lambda)$ в сигналы приемников $s_{ij}(\lambda)$ определяется выражением, учитывающим априорно заданное спектральное разрешение гипертрактометра:

$$s_{ij}(\lambda) = p t_n \delta^2 \sum_{k=1}^L \{ \tau_p(\lambda) \eta(\lambda) \Delta_{o\lambda} C(\rho_{ij}(\lambda)) \}, \quad (2)$$

где $p = d^2(1 - \varepsilon^2) / 4f_p^2$ — угловой параметр апертуры прибора.

Параметры аппаратуры: d — размер входного отверстия объектива; f_p — фокусное расстояние; δ — размер элементарного приемного элемента (предполагается квадратным); ε — отношение диаметра вторичного и первичного зеркал; t_n — время накопления; $\eta(\lambda)$ — спектральная чувствительность приемника; $\tau_p(\lambda)$ — спектральное пропускание прибора; $\Delta_{o\lambda}$ — интервал спектральной дискретизации (1 нм); L — число спектральных интервалов дискретизации; $C(\rho_{ij}(\lambda))$ — спектральная плотность энергетической яркости на апертуре в зависимости от КСЯ текущего элемента ij , рассчитывается на основе модели MODTRAN 5.2 с учетом свойств атмосферы для заданной метеорологической дальности видимости, типа аэрозоля и высоты Солнца.

Для имитации прохождения сигналов через тракт формирования, предварительно рассчитывается таблица спектральных зависимостей сигналов (2) для ряда $\rho_{ij}(\lambda) = 0(0,1)1,0$. По ним в ходе расчета спектрального «куба» выбираются интерполированные значения для текущих ij значений КСЯ пространственного шаблона.

Расчет сигнала от фоновой облученности для оценки спектрального шума в канале $s_{ij}(\lambda)$ производится также на основе выражения (2) для заданного значения спектрального альbedo (принято 0,4).

Оценка среднеквадратических отклонений (СКО) шума в спектральных каналах проводится опосредованно, для чего сначала рассчитывается отношение сигнала к шуму [Гудмен, 1988]

$$\zeta(\lambda) = \frac{N_f(\lambda)}{k_s \sqrt{\sigma_f^2(\lambda) + 2\sigma_p^2(\lambda)}}, \quad (3)$$

где $N_f(\lambda)$ — уровень фотонного шума, $\sigma_p^2(\lambda)$ — дисперсия собственных шумов приемных элементов, k_s — коэффициент.

Коэффициент k_s учитывает случайные и частично регулярные шумы на сформированных снимках. Если эти шумы хорошо скомпенсированы в ходе первичной обработки, можно априорно принять $k_s \approx 1,2$ (конкретные алгоритмы компенсации [Шовенгердт, 2010]). Отсюда СКО шума в спектральных каналах определяется выражением:

$$\sigma(\lambda) = s_f(\lambda) / \zeta(\lambda), \quad (4)$$

где λ — средняя длина волны в каждом канале.

Влияние абберационного размытия по каналам моделируется на основе линейной теории оптических систем в соответствии с моделью [Остриков, Плехотников, 2006]. На полученные размытые образы аддитивно накладывается нормальный шум (4).

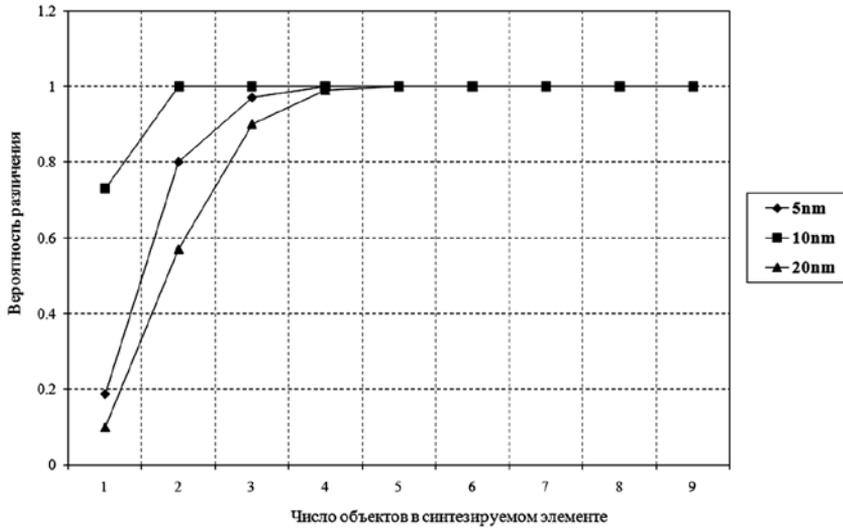
Полученные сигнальные распределения яркостей по пространственному тестовому шаблону (набор оцифрованных значений спектрального «куба» данных) пересчитываются «обратно» в распределения КСЯ (имитация внешней калибровки). Для этого по случайным значениям тестового шаблона рассчитывается среднее $\bar{s}_f(\lambda)$, после чего, априорно предполагая известным среднее по КСЯ фона $\bar{\rho}_f(\lambda)$, пересчитывается весь сигнальный «куб»

$$\tilde{\rho}_{ij}(\lambda) = \frac{\tilde{s}_{ij}(\lambda) \bar{\rho}_f(\lambda)}{\bar{s}_f(\lambda)}, \quad (5)$$

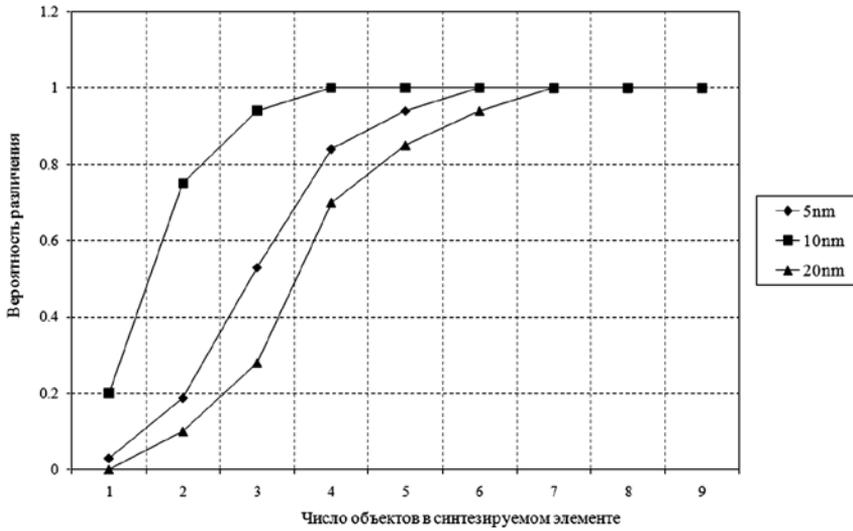
где $\tilde{s}_{ij}(\lambda)$ — сигнальный спектр текущего пикселя тестового образа.

Для имитации возможностей спектрального различения выбранной пары объект — фон применяется субпиксельный метод. Его суть — в проецировании каждого $\tilde{\rho}_{ij}(\lambda)$ на два исходных (предполагаемых априорно известными) средних $\bar{\rho}_o(\lambda)$ и $\bar{\rho}_f(\lambda)$ [Шовенгердт, 2010]. Отнесение текущей проекции решения к объекту или фону (решающее правило) может быть построено различными методами, в зависимости от априорных данных.

На рисунке приведены результаты расчетов вероятностей различения выбранной спектральной пары. Имитировались синтезированные элементы разрешения спектрометра применительно к биннингу 8×8 (а) и 16×16 (б). Основные параметры прибора: относительное отверстие 1:12, коэффициент экранирования 0,32, элемент приемной матрицы 7 мкм. Высота наблюдения 425 км (в надир). Условия наблюдения: субарктическая атмосфера, метеодальность видимости 50 км, высота Солнца 60° . Приведенные кривые рассчитаны для спектрального разрешения аппаратуры 5, 10 и 20 нм. Интересным представляется тот факт, что оптимальное имитируемое спектральное разрешение соответствует 10 нм.



a



б

б

Вероятности спектрального различения пары для биннинга 8×8 (*a*) и 16×16 (*б*)

Таким образом, разработанная модель позволяет оценивать потенциальные возможности разделения различных спектральных пар в зависимости от условий наблюдения и параметров используемых видеоспектрометров. Она также позволяет заранее анализировать возможности разделения отдельных пар используемой спектральной библиотеки и выбирать базовые векторы, отстоящие между собой на спектральный контраст, разрешаемый аппаратурой с заданными параметрами. На базе модели возможно проведение исследований по выбору наиболее подходящих спектральных окон для решения конкретных хозяйственных задач по данным спектрального дистанционного зондирования Земли.

Литература

- [Гудмен, 1988] *Гудмен Дж.* Статистическая оптика. М.: Мир, 1988. 527 с.
- [Остриков, Плахотников, 2006] *Остриков В. Н., Плахотников О. В.* Идентификация функции рассеяния точки канала наблюдения по калибрующему изображению посредством метода наименьших квадратов // *Оптич. журн.* 2006. Т. 73. № 2. С. 26–30.
- [Шовенгердт, 2010] *Шовенгердт Р. А.* Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений / Пер. с англ. А. В. Кирюшина и А. И. Демьяникова. М.: Техносфера, 2010. 556 с.

SIMULATION ESTIMATES OF POSSIBILITIES FOR ON-BOARD HYPERSPECTRAL SENSORS ON SMALL SATELLITES

V. N. Ostrikov, O. V. Plakhotnikov, K. M. Shulika

Joint-Stock Company “Luch”, Saint-Petersburg

The paper describes issues related to the use of on-board hyperspectral sensors on small satellites. Properties of system were developed with a help of simulation model for hyperspectral data which were passed optical media imitation. Estimations for spectral pairs discrimination by subpixel method are considered.

Keywords: hyperspectral data, simulation models, spectral recognition.

Ostrikov Vadim Nikolaevich — master of science, PhD, senior scientist, e-mail: ostrvad@mail.ru.
Plakhotnikov Oleg Vladimirovich — head of the department, PhD, e-mail: oleg-vl@yandex.ru.
Shulika Konstantin Mikhailovich — deputy director, PhD, senior scientist, e-mail: shulken@yandex.ru.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛЕДЯЩЕГО ДАЛЬНОМЕРНОГО КАНАЛА ОДНОКАМЕРНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Д. В. Васильев, А. В. Гапон, А. С. Коротеев, В. А. Никонов

*Открытое акционерное общество Научно-производственная корпорация
«Системы прецизионного приборостроения» (ОАО «НПК «СПП»), Москва*

На примере решения задачи оптического измерения расстояния в целях автоматической стыковки космических аппаратов реализован ортокорреляционный дискриминатор масштабного сдвига 2D-изображений и модель двухконтурной следящей системы с использованием этого измерительного звена. Работоспособность алгоритмов продемонстрирована на массиве полунатурных сюжетов.

Ключевые слова: оптическое измерение расстояния, взвешенная ортокорреляция, беспойсковое корреляционное слежение, автозахват, зум-объектив, субпиксельная точность, слежение за масштабным сдвигом.

Введение

Измеритель текущего масштаба изображения актуален в системах технического зрения (СТЗ) для отслеживания и компенсации масштабных сдвигов в задачах извлечения 3D-информации из 2D-сигналов.

Цель работы — исследование возможностей построения однокамерной пассивной ТВ-системы слежения за дальностью с применением беспойскового ортокорреляционного дискриминатора масштаба (ОКДм), формирующего оценку масштабного сдвига между эталонным и текущим изображениями, поступающими на его вход.

Приводятся результаты разработки и моделирования ОКДм. Представлена система слежения за масштабом (ССм), функциональная схема которой показана на рис. 1. В ССм межкадровый масштабный сдвиг, возникающий из-за изменения расстояния до наблюдаемого объекта, измеряется алгоритмом ОКДм и компенсируется приводом зум-объектива в электромеханическом контуре (ЭМК) и окном сопровождения, управляемым электронным контуром (ЭК). Интегрирующий фильтр обратной связи (ФОС) накапливает текущую оценку масштабного сдвига, которая на основе известных начальных данных пересчитывается в дальность.

1. ДИСКРИМИНАТОР МАСШТАБНОГО СДВИГА

Как показал ряд предшествующих работ, для цифровой реализации ОКД наиболее эффективны и удобны алгоритмы *нестационарных корреляционных дискриминаторов* (НКД), входными сигналами к которым являются пары

Васильев Дмитрий Валериевич — ведущий научный сотрудник, доктор технических наук, профессор, e-mail: 02@niipp-moskva.ru.

Гапон Андрей Викторович — инженер, кандидат технических наук.

Коротеев Александр Сергеевич — инженер, e-mail: lord_of_hell@mail.ru.

Никонов Виктор Анатольевич — инженер, e-mail: Victor.Nikonov@gmail.ru.

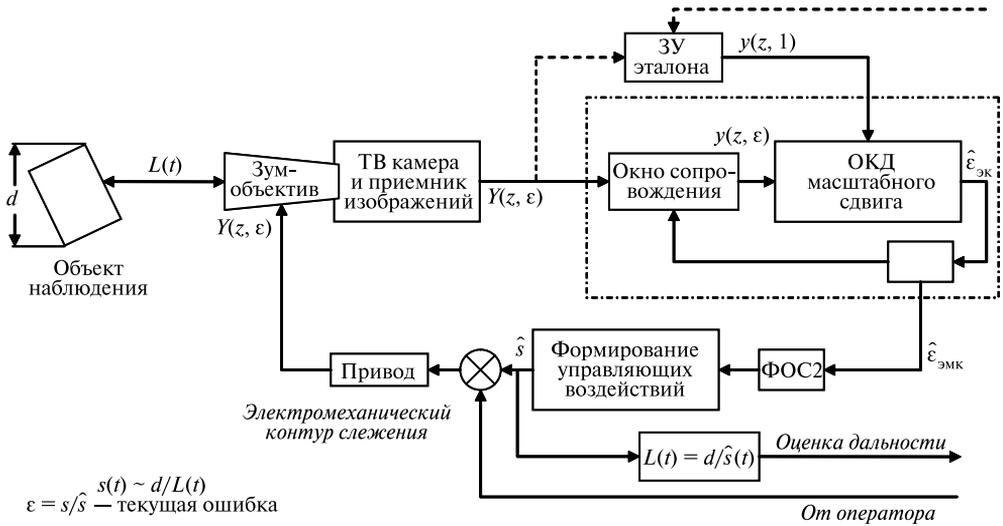


Рис. 1. Функциональная схема системы слежения за масштабом: L — дальность до объекта наблюдения; s — масштабный сдвиг

2D-изображений. Авторами построен НКД для измерения масштаба (НКДм) на основе подхода, изложенного в предшествующих работах [Васильев и др., 2007a; Васильев, 2011]. Применено так называемое ζ -преобразование координат, при котором масштабный сдвиг приобретает свойства аддитивности

$$\zeta = -\log_b |z| = \log_b \frac{1}{\sqrt{z_1^2 + z_2^2}}, \quad (1)$$

где b — малая константа.

Это позволяет применить в системе ζ -координат (ζ -СК) известный аппарат ОКД аддитивного сдвига. При этом возможны быстродействующие модификации алгоритма, при которых ζ -преобразованию подвергаются лишь базисные функции, а не входные сигналы. Константа b даёт возможность управлять апертурой ДХм в обмен на её гладкость в окрестности нуля, что полезно использовать в различных режимах ССм.

Для экспериментов использован алгоритм НКДм с двумерными центрально-симметричными базисными функциями (БФ) по размеру входных сигналов. Помимо малых вычислительных затрат, такой выбор БФ позволяет ослабить перекрёстное влияние сдвига по крену.

Подход проиллюстрирован в сопровождавшей доклад авторов презентации, которую можно найти на сайте <http://tvcs2011.technicalvision.ru/> или <http://www.iki.rssi.ru/>.

1.1. Краевой эффект

Наибольшие отклонения формы ДХ от линейной вносят краевые эффекты (КЭ) [Васильев и др., 2007б], вызванные тем, что при наличии сдвига на текущем изображении могут быть участки сцены, отсутствующие в эталоне, и наоборот, некоторые участки, присутствующие в эталоне, уходят за пределы поля зрения.

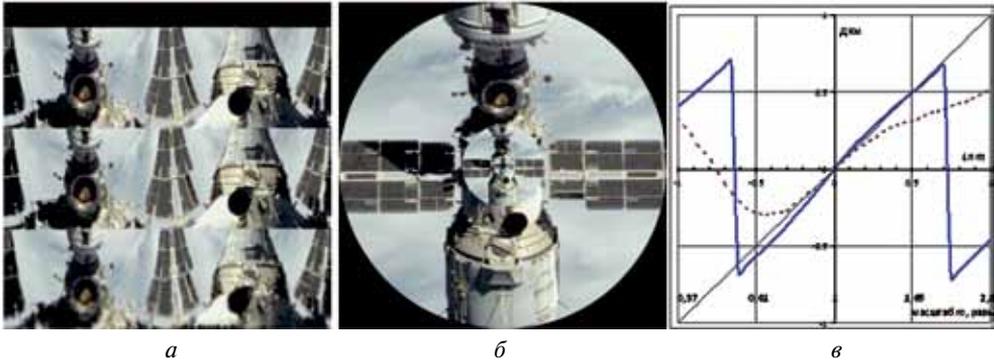


Рис. 2. Циклическое продолжение произвольного сюжета в ζ -СК (а); сюжет в декартовой СК (б); ДХм с учётом КЭ (пунктир) и без КЭ (сплошная) (в)

Для оценки предельных свойств НКДм в ходе исследования построен пример ДХм в отсутствие КЭ. Для этого сформированы сюжеты с циклическим продолжением входного сигнала в ζ -СК (рис. 2а). Обратное преобразование к декартовым координатам дает сюжет на рис. 2б, который будет циклическим продолжением исходного сюжета по масштабному сдвигу. На рис. 2в показаны ДХм, полученные для одного и того же эталона в естественных условиях наличия КЭ (пунктирная линия) и его отсутствия (сплошная линия). Случай отсутствия КЭ демонстрирует минимально возможное отклонение ДХм от линейной для заданных БФ.

1.2. Экспериментальная ДХм

Мерой инвариантности ДХм к смене сюжета принимается величина σ средне-квадратичного отклонения (СКО) ДХм, рассчитанная на множестве типовых сюжетов (рис. 3).

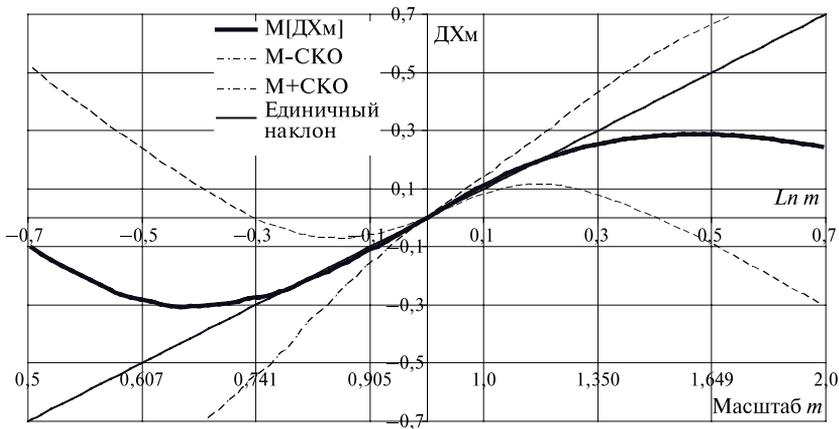


Рис. 3. ДХм, усредненная на множестве сюжетов. Пунктиром показан разброс характеристик в пределах $\pm\sigma$

Важные свойства ОКД — «строгий нуль» ДХ и ее монотонность в окрестности нуля. Под строгим нулём понимается свойство алгоритма формировать в отсутствие помех нулевой выход при нулевом сдвиге между входными изображениями независимо от состава сюжета. Учитывая, что задача ССм — удержание окна сопровождения в точке нулевого сдвига, это свойство ДХ измерительного звена обеспечивает точность слежения за компонентами сдвига, слабо зависящую от разрешения входных сюжетов.

2. СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА МАСШТАБОМ (ССМ)

В программной среде Simulink™ смоделирован контур слежения за изменением масштаба во входном сигнале, соответствующий схеме на рис. 1. Входным сигналом для системы считается последовательность 2D-изображений с межкадровым масштабным рассогласованием, изменяющимся по некоторому заданному закону. Для компенсации сдвига реализованы ЭК и ЭМК. Подробнее об их свойствах и возможностях [Васильев, 2011, с. 124–125]. В данной модели эти контуры применяются последовательно для расширения диапазона слежения всей системы. Фильтр обратной связи содержит два интегратора, что придает ССм астатизм второго порядка.

Для исследования работоспособности и свойств системы слежения проведена серия экспериментов. Использовались окна сопровождения 64×64 и 100×100 пикселей. В качестве входного изображения взяты фотоснимки МКС.

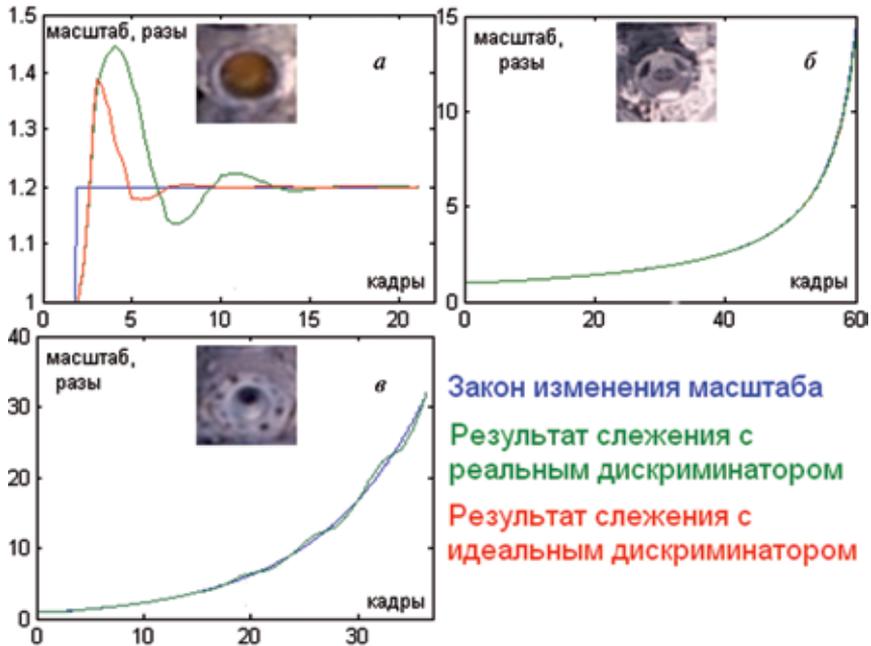


Рис. 4. Результаты моделирования ССм и эталонные изображения для этих экспериментов. Идеальный дискриминатор выдаёт точное значение сдвига и позволяет судить о поведении системы слежения при заданном входном сигнале без влияния мешающих факторов

На них выбран ряд точек прицеливания и смоделированы различные законы взаимного движения (рис. 4):

- график *a* — реакция ССм на скачок по масштабу на 20 %;
- график *b* — реакция ССм на изменение масштаба по гиперболическому закону, соответствующему сближению с постоянной скоростью;
- график *в* — реакция ССм на изменение масштаба при наличии нескомпенсированного аддитивного сдвига начиная с кадра 15.

(На графиках *b* и *в* красная линия почти совпадает с синей.)

Выводы

1. Возможно создание алгоритма НКДм и системы регистрации дальности путём слежения за масштабом наблюдаемого объекта.

2. Алгоритм НКДм с двумерной базисной функцией по раскрытию апертуры и монотонной зоны, «строгую нулю» и устойчивости к мешающим факторам пригоден для применения в составе ССм.

3. ССм с КДм в качестве измерителя ошибки слежения за таким важным одномерным параметром, как масштабный сдвиг, работоспособна и обладает свойствами, характерными для линейной системы авторегулирования.

4. Система может служить основой одного из контуров комплекса средств измерения дальности на этапе сближения КА до механического захвата при стыковке.

Литература

- [Васильев, 2010] *Васильев Д. В.* Фрагменты прикладной теории систем технического зрения для беспилотных летательных аппаратов // Технич. зрение в системах управления мобильными объектами-2010: Тр. научно-технич. конф.-семинара. Вып. 4 / Под ред. Р. Р. Назирова. М.: КДУ, 2011. С. 109–131.
- [Васильев и др., 2007а] *Васильев Д. В., Гапон А. В., Сумерин В. В., Фирсов Е. А.* Автозахват направления по изображению с использованием скользящей фильтрации // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12. № 7. С. 49–52.
- [Васильев и др., 2007б] *Васильев Д. В., Григорьев К. А., Никонов В. А.* Краевые эффекты в корреляционных дискриминаторах сдвига изображений // Электромагнит. волны и электрон. системы. 2007. Т. 12. № 9. С. 61–71.

SIMULATION OF A TRACKING RANGEFINDING TECHNICAL VISION SYSTEM FOR SPACE VEHICLES

D. V. Vasilyev, A. V. Gapon, A. S. Koroteev, V. A. Nikonov

Open Joint Stock Company Research and Production Corporation of Precision Scientific Instruments (“System of Precision Instrument Making”), Moscow

An approach to optical range tracking for automated space vehicle docking is demonstrated by designing a correlation 2D scale shift discriminator and a two-loop tracking system based on its algorithm. Their efficiency is demonstrated on a set of constructed images.

Keywords: optical range tracking, weighted orthocorrelation, searchless correlation tracking, autolock, zoom lens, subpixel accuracy, scale shift tracking.

Vasilyev Dmitry Valerievich — leading scientist, doctor of technical science, professor, e-mail: 02@niipp-moskva.ru.

Gapon Andrey Viktorovich — engineer, candidate of technical science.

Koroteev Aleksandr Sergeevich — engineer, e-mail: lord_of_hell@mail.ru.

Nikonov Viktor Anatolievich — engineer, e-mail: Victor.Nikonov@gmail.ru.

ФАСЕТОЧНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ДАТЧИК КАК СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ

В. Д. Глазков, В. А. Котцов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва

В работе изложены особенности построения фасеточного солнечного датчика, как бескамерной системы технического зрения, для автономного управления космическим аппаратом. Отсутствие камеры и собирающей оптики, минимум фотоэлектрических преобразователей и эффективное использование их чувствительных поверхностей, многоядерный конвейерный принцип обработки фототоков по заданному алгоритму, наличие интеллекта, возможность спектральной селекции при вертикальной тандемной или каскадной композиции фотоэлектрических преобразователей, а также коррекции угловой нелинейности и увеличения точности результатов отсчетов — главные достоинства фасеточного солнечного датчика. Всё это позволяет создавать высоконадежные бортовые системы технического зрения, в том числе автономные, для управления космическим аппаратом, которые не боятся сторонних засветок, реализуют различные поля обзора с достаточной угловой точностью отсчетов и линейностью в его пределах при высоком быстродействии, и имеют ультра малые массы, объем и электропотребление.

Ключевые слова: космический аппарат, фасеточный солнечный датчик, фотоэлектрический преобразователь, каскадные преобразователи солнечной энергии, ориентация, навигация, поле обзора, система технического зрения.

Солнечные датчики (СД) — специализированные приборы систем технического зрения (СТЗ), которые определяют угловое направление на Солнце в системе координат космического аппарата (КА). Фасеточный солнечный датчик (ФСД) — двухкоординатный прибор бескамерного типа [Глазков и др., 1989]. По-сути — это совокупность определенным образом взаимно ориентированных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП).

Если для оценки угла отклонения излучения от нормали достаточно одного планарного ФЭП, то для знания пространственных характеристик о направлении на Солнце необходимо минимум три фотоэлектрических преобразователя. Удобнее использовать две пары планарных ФЭП, разместив их взаимно перпендикулярно на гранях усеченной правильной прямоугольной пирамиды (рис. 1).

ФЭП поглощает часть света и преобразует в фототок. Целесообразно использовать фотогальванический режим работы ФЭП — без внешнего питающего напряжения. Работа в этом режиме может быть представлена вольт-амперной зависимостью выходного напряжения от фототока и апертурной (угловой) характеристикой — изменением величины выходного тока ФЭП от угла падения излучения на его светочувствительную поверхность (рис. 2).

Глазков Вячеслав Данилович — старший научный сотрудник, кандидат технических наук, e-mail: vdgl azkov@gmail.com.

Котцов Владимир Александрович — научный сотрудник, e-mail: vladvkott@mail.ru.

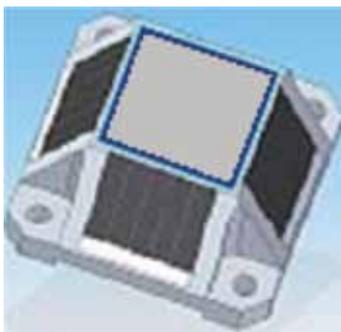


Рис. 1. Вариант ФСД в виде усеченной правильной прямоугольной пирамиды

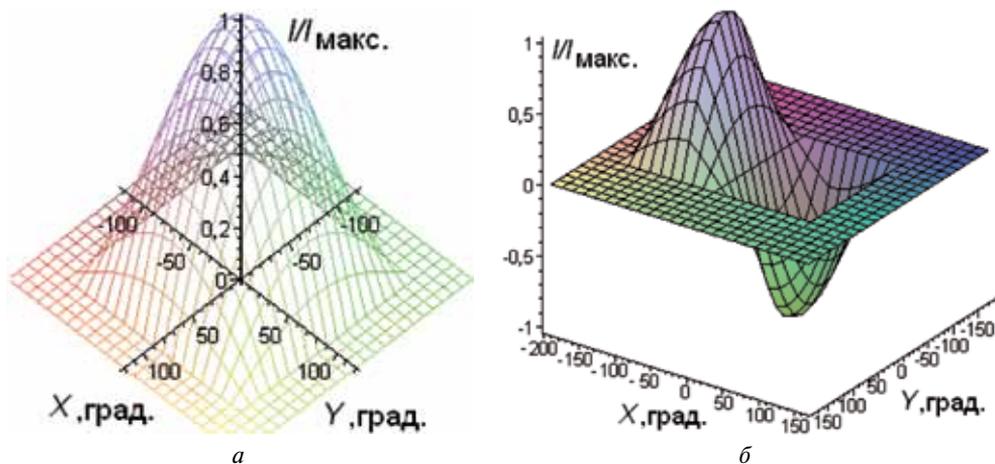


Рис. 2. Апертурная характеристика ФЭП с планарной фоточувствительной поверхностью (а) и дифференциальная характеристика фототоков двух ФЭП (б)

Если апертурная характеристика ФЭП имеет косинусную зависимость (см. рис. 2а), то алгебраическая сумма токов взаимно перпендикулярных расположенных пар ФЭП даст информацию о направлении на Солнце. ФЭП полярный преобразователь и, в зависимости от полярности включения пар, при сложении их фототоков получаем или разностный, или суммарный сигналы. Если ФЭП имеют косинусные характеристики, то наиболее информативной схемой включения фотоэлектрических преобразователей будет их встречное соединение (см. рис. 2б). Устройство обработки ФСД может представлять собой: пассивный резистор, активный токовый элемент или операционный усилитель. Результаты обработки токов ФЭП содержат количественную информацию об угловых характеристиках потока излучения от Солнца. Суммирование однополярных токов пар ФЭП обеспечивают нормализацию данных ФСД.

В солнечных датчиках на основе планарных ФЭП, реальные апертурные характеристики фотоэлектрических преобразователей могут отличаться от косинусной зависимости. Вводя оптические или фотоэлектрические корректоры в схему ФСД, значительно уменьшаем их погрешность. ФСД может иметь поле

обзора около 80° , при точности порядка одного градуса. Размеры поля обзора ФСД со скорректированными характеристиками ФЭП достигают $140 \times 140^\circ$ при точности измерения менее $0,5^\circ$. Для изменения поля обзора достаточно изменить наклоны боковых граней, на которых расположены ФЭП, но при этом меняется и угловая точность.

ФСД характеризуются большим отношением сигнал/шум, так как в преобразовании света в электрический ток участвует вся чувствительная поверхность ФЭП, а не его отдельная часть, как в СД камерного типа. Когда ФЭП работают в режиме «короткого замыкания», то темновой ток насыщения минимален или равен нулю. Режим «короткого замыкания» обеспечивает повышенные значения угловой точности и быстродействия прибора.

Поле обзора ФСД всегда меньше $180 \times 180^\circ$. Но композиция из двух и более пирамид с разным наклоном граней может решить проблему реализации СД с большими полями обзора. На рис. 3 представлен вариант построения ФСД с увеличенным полем обзора в виде композиции двух вертикально-штабелированных усеченных пирамид с разным наклоном боковых граней, а также графики зависимости фототоков вдоль одной координаты ФСД. Процессы дифференцирования и суммирования фототоков осуществляются одновременно, обеспечивая нормализацию данных.

Частичное затенение или засветка отдельных фотоэлементов искажает выходные результаты угловых определений. Прибор можно наделить интеллектуальными способностями для исключения недостоверных результатов [Котцов, Глазков, 2007]. В основе принятия решения лежит фотометрический баланс — равенство сумм фототоков пар ФЭП, размещенных на противоположных гранях правильной пирамиды. Несимметричное затенение, подсветка ФЭП или их деградация ведет к нарушению баланса. Отсутствие баланса считается критерием для исключения текущих результатов измерения.

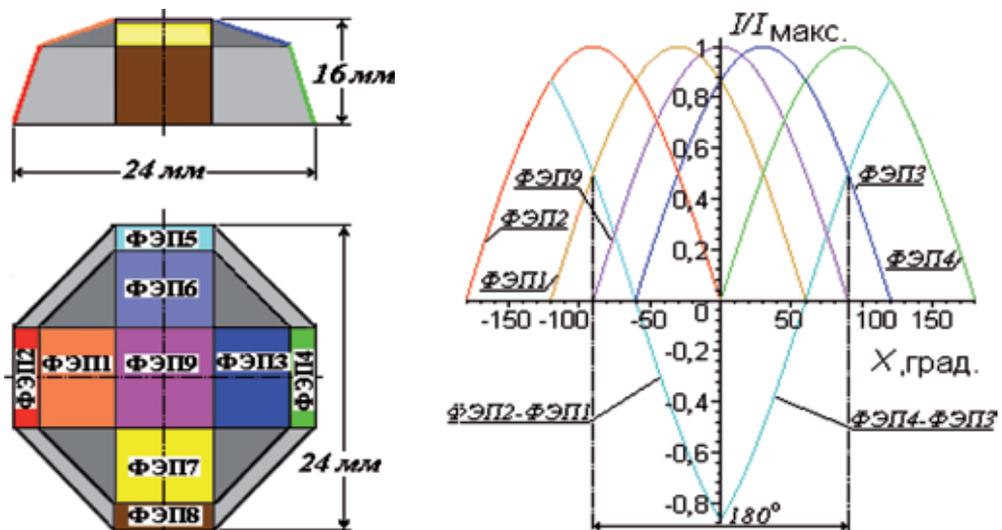


Рис. 3. Вариант конструкции ФСД и её габаритные размеры при поле обзора прибора $180 \times 180^\circ$ и нормированные апертурные характеристики ФЭП1—ФЭП9 вдоль одной из координат

Успех создания надежного ФСД в значительной степени определяется выбором материала для ФЭП. Примером может служить использование солнечных элементов на основе Si и GaAs-полупроводников, генерирующих электроэнергию для КА. Из-за относительно быстрой деградации во времени эти материалы с трудом подходят для фотоэлектрических преобразователей ФСД, реализующих функции СТЗ. Однако ФЭП на основе тонкослойных широкозонных полупроводниковых материалов, таких как GaP, 6H-SiC, 4H-SiC, GaN, BN, C алмаз, AlN и др., которые могут более стабильно и продолжительно функционировать без внешней защиты в условиях космоса, вполне подходят для этих приборов.

Широкозонные ФЭП представляют собой различные p-n, гетеро, варизонные структуры и фотодиоды на основе барьеров Шоттки. Технология их изготовления освоена российской промышленностью, налажен малосерийный выпуск вышеперечисленных элементов и массивов разных размеров и профилей. Спектральная чувствительность этих фотоэлектрических преобразователей находится в ультрафиолетовой зоне спектра. Ультрафиолетовые ФЭП более стойки к космической радиации, чем Si и GaAs-полупроводниковые структуры, способны работать в широком интервале температур, обладают большим динамическим диапазоном, их параметры не изменяются после воздействия повышенной засветки.

Ультрафиолетовые ФЭП на основе твердых растворов полупроводниковых нитридов, могут иметь резкий длинноволновый край чувствительности, расположенный в любой части ультрафиолетовой области излучения, что существенно для ФСД. Максимальные значения их токовой чувствительности соответствуют квантовой эффективности 0,8...0,9 и близки к теоретическому пределу. Аналогичное положение наблюдается и с величиной постоянной времени ультрафиолетовых ФЭП, особенно структур с барьерами Шоттки, определяемой их RC-цепью, составляющей всего десятки или сотни наносекунд. За счет повышения чистоты исходных материалов для ФЭП из III-нитридов можно приблизиться к теоретическому пределу в части их обнаружительной способности.

Поток солнечного излучения на верхней границе атмосферы Земли составляет 1368 ± 7 Вт/м², что избыточно для ФСД. Следовательно, одновременно с решением главной задачи, можно получать и электроэнергию для питания прибора. Идея реализована в камерном варианте прибора ориентации на Солнце [Котцов, Глазков, 2007]. При реализации ФСД возможен существенный выигрыш.

Спектр в диапазоне длин волн (0,2...4,0 мкм) можно поделить на три зоны. Ультрафиолетовая (0,2...0,4 мкм) — на ее долю приходится 7 % энергии Солнца; на видимый диапазон длин волн (0,4...0,75 мкм) — 46 % его энергии; инфракрасная часть излучения (0,75...4,0 мкм) составляет 47 %.

Верхний теоретический предел удельной обнаружительной способности D^* при комнатной температуре ФЭП равен 10^{-17} Вт⁻¹Гц^{1/2}см. При минимальных длинах волн электромагнитного спектра, в ультрафиолетовой области, значения D^* для ФЭП составляют 10^{-14} ... 10^{-15} Вт⁻¹Гц^{1/2}см. Энергетически достаточно ультрафиолетовой области, чтобы решить основную задачу ФСД, для нее есть и подходящие ФЭП. Остальную энергию целесообразно преобразовать в электрический ток и использовать для питания прибора.

Для построения автономного ФСД можно заменить однослойные ФЭП на двухслойные или многокаскадные их композиции в виде штабеля ФЭП или их монолитной конструкции (рис. 4). В такой упаковке верхние ФЭП должны быть выполнены на оптически прозрачных диэлектрических подложках, например, на сапфире с прозрачными токопроводящими электродами в виде керамических

пленок ИТО (механической смеси оксидов In_2O_3 и SnO_2). Тогда, каждый ФЭП в двухслойной структуре будет преобразовывать в электрический ток только ту часть падающего излучения электромагнитного спектра, которая поглощается его полупроводниковым фотоэлектрическим преобразователем, пропуская оставшиеся части на нижележащие фоточувствительные слои.

В зависимости от назначения ФЭП — фотодатчик направления или генератор электроэнергии — они могут работать в разных режимах: короткого замыкания (фотогальванический режим) или отбора максимальной мощности, чтобы выполнять различные функции. Конструкция штабеля упрощается, а качественные и энергетические показатели существенно возрастают, если имеем тандем — фотодатчик и генератор электроэнергии, представленный в виде гальванически развязанных двух полупроводниковых структур. Необходимо отметить, что в силу различной прозрачности по спектру фотодатчика направления, с помощью штабеля из ФЭП возможна реализация как моноблочной конструкции ФСД, так и распределенной, когда для его построения используются подходящие близлежащие поверхности элементов КА. Это очень важно для микрокосмических аппаратов, которым присущ дефицит массы и объема.

Главной причиной ложной регистрации солнечного излучения в поле обзора ФСД для КА на околоземной орбите считается свет альbedo Земли (рис. 5). Как было показано выше, можно исключить эти результаты из информационного потока прибора, используя фотометрический баланс, но не полностью разрешить эту проблему. Есть способ спектронального варианта борьбы с указанным недостатком, который целесообразен в ФСД, так как требует минимальных затрат — выбора и применения полосового ФЭП [Глазков, Котцов, 2009].

Известно, что полное исчезновение планеты как излучающего небесного тела происходит в теллурических полосах спектров планет. У Земли это наблюдается в спектральных полосах: 0,23...0,29 мкм (озон); 1,35...1,41, 1,8...1,9 и 2,57...2,77 мкм (вода и углекислый газ). Следовательно, для автономного ФСД возможно зональное исключение света, отраженного от Земли, в перечисленных спектральных полосах. Предпочтение следует отдать варианту 0,23...0,29 мкм в ультрафиолетовой области спектра, так как для этого есть подходящие ФЭП.

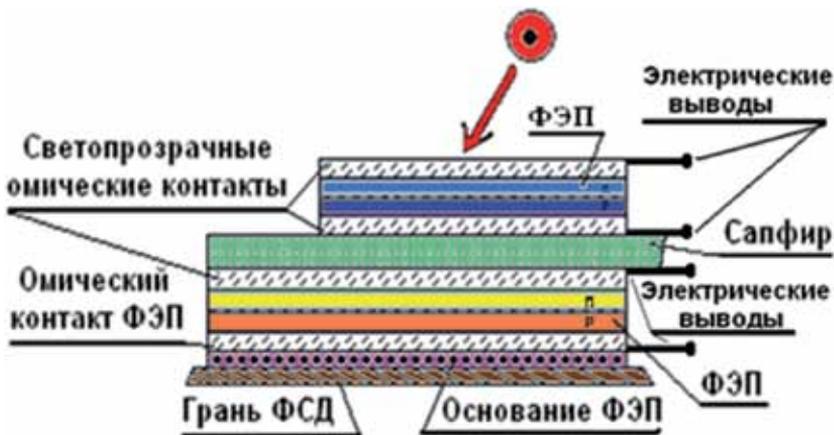


Рис. 4. Конструкция вертикальной монолитной композиции двух ФЭП, размещенной на грани ФСД

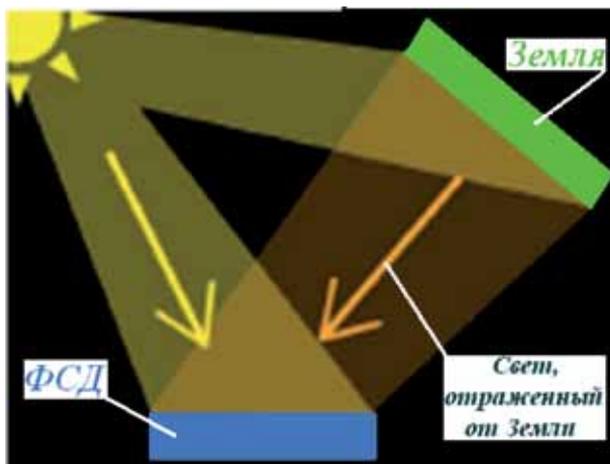


Рис. 5. Схема, показывающая влияние света, отраженного от Земли на результаты работы ФСД

Величина внеатмосферного солнечного потока в первой полосе спектра Солнца на 1 см^2 фоточувствительной площади ФЭП составляет $0,402 \text{ мВт}$ и в 213 раз меньше отраженного от Земли лучистого потока ($0,1884 \cdot 10^{-2} \text{ мВт}$), что согласуется с данными её альбедо. Следовательно, выбрав для ФСД ультрафиолетовый ФЭП, например, на основе III-нитридов с полосой чувствительности $0,23 \dots 0,29 \text{ мкм}$ можно снизить влияние засветки от Земли более чем на два порядка. Использование других спектральных полос для разрешения этой проблемы несколько усложнит построение ФСД.

Требования обеспечения высокой точности измерений по углу и реализации большого размера поля обзора одним СД одновременно фактически невыполнимы. У каждого вида СД — камерного и бескамерного — есть в этом отношении свой предел. СД камерного вида более точные приборы, чем бескамерные, но при малых полях обзора, у ФСД — наоборот. В ряде случаев приходится переходить к кластерам, объединяющим несколько разнонаправленных СД камерного вида с узкими полями зрения, но реализующих необходимую точность отсчетов по углу. Другой подход к разрешению проблемы точности — создание гибрида — композиции ФСД и СД камерного вида.

Внешне это ФСД, каждая грань которого содержит ФЭП. Но внутри под каждой гранью размещены небольшие массивы линейных профильных фотодиодов. Кроме того, под фотоэлектрическими преобразователями ФСД расположена непрозрачная диафрагма с поперечной щелью, она или каждый фотоэлектрический преобразователь разделены на две части, тогда их подложки выполняют функцию диафрагмы. Конструкция такой композиции показана на рис. 6.

В отличие от линейки приборов с зарядовой связью число профильных фотодиодов в массиве невелико. Принцип работы такого гибрида прост. Пусть имеем прямоугольную усеченную пирамиду, каждая грань которой представляет собой описанную композицию. Здесь, внешние ФЭП реализуют функцию обзора большого поля с относительно низкой точностью результатов отсчета. Одновременно, в зависимости от угла падения солнечного излучения, прошедшего через поперечную щель, работает одна из пар профильных фотодиодов массива,

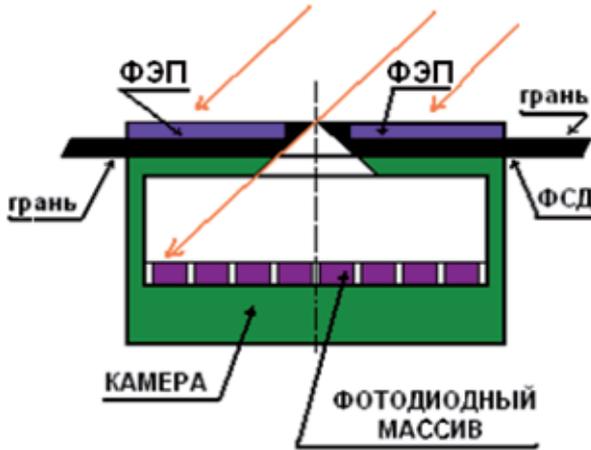


Рис. 6. Конструкция композиции ФСД и СД камерного типа

расположенного под диафрагмой. Работающая пара фотодиодов массива включена в этот момент встречно. Суммирование встречных фототоков пары позволяет получить квазилинейную зависимость выходного сигнала от угла падения на фотодиоды через щель излучения. Остальные фотодиоды массива не работают и находятся в режиме ожидания. Функционирующая пара охватывает только часть поля обзора. Композиция внешних ФЭП на каждой грани и расположенного за щелью массива фотодиодов, позволяет создать гибридный вариант прибора ориентации на Солнце.

Технологический прогресс в области материалов обещает большой спектр новых компонентов. Замена Si на твердые растворы АЗВ5 и III-нитриды, использование гетеропереходов и других полупроводниковых структур, а также переход к тандемным и каскадным объединениям фотодиодов для более эффективного преобразования солнечного излучения в электрический ток обеспечат дополнительные возможности. Фасеточные солнечные датчики будут иметь малые массу и габариты, а также смогут работать автономно с интеллектуальным контролем точности.

Литература

- [Глазков и др., 1989] Глазков В. Д., Куделин М. И., Эйсмонт Н. А. Прибор для получения информации об ориентации искусственных спутников Земли // 4-й Международ. семинар «Научное космич. приборостроение». Фрунзе. 18–24 сент. 1989. М.: ИКИ АН СССР, 1989. С. 121–122.
- [Котцов, Глазков, 2007] Котцов В. А., Глазков В. Д. Солнечный датчик с интеллектуальными способностями // Космич. приборостроение. Координатно-временные системы с использованием космич. технологий. Приборы для космич. исслед. планет и Земли: Сб. тр. по результатам выездного семинара / Под ред. Назирова Р. Р. Россия, Таруса. 7–9 июня 2006. М.: ИКИ РАН, 2007. С. 114–119.
- [Глазков, Котцов, 2009] Глазков В. Д., Котцов В. А. Фасеточные датчики солнечной ориентации // Современ. проблемы определения ориентации и навигации космич. аппаратов: Сб. тр. Всерос. научно-технич. конф. Россия, Таруса. 22–25 сент. 2008. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 136–145 (Сер. «Механика, управление и информатика»).

FACETED SOLAR SENSOR AS A TECHNICAL VIEWING SYSTEM FOR INDEPENDENT CONTROL OF A SPACECRAFT

V. D. Glazkov, V. A. Kotsov

Space Research Institute (IKI RAN), Moscow

In the paper, the peculiarities of design developing of a faceted solar sensor as a without-camera technical viewing system for independent control of a spacecraft is presented. The main advantages of a faceted solar sensor are: lack of camera and collecting optics, the minimal amount of photoelectrical transducers and effective use of its sensitive surfaces, multinuclear conveyor principle of the processing of photocurrent according to a given algorithm, presence of intellect, the possibility of spectral selection in the case of vertical tandem or cascade type of disposition of the photoelectrical transducers as well as angular non-linearity correction and increasing of the precision of the results of counts. All this makes it possible to design high-reliability on-board systems of technical viewing, including independent, for spacecraft control. These systems are resistant to stray lighting, can realize different fields of view with relatively high precision of counts and linearity within its boundaries at high-speed performance and have extra small mass, volume and power consumption.

Keywords: spacecraft, faceted solar sensor, photoelectrical transducer, cascade transducers of solar energy, orientation, navigation, field of view, systems of technical viewing.

Glazkov Viacheslav Danilovich — senior scientist, PhD, e-mail: vdglazkov@gmail.com.
Kotsov Vladimir Alexandrovich — scientist, e-mail: vladkott@mail.ru.

СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ РАБОТУ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Н. И. Дмитриев, А. А. Хрусталеv, А. И. Ляпин, Е. Ю. Суворов

ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», Нижний Новгород

Рассматривается система распознавания объектов, предназначенная для автоматического обнаружения, распознавания объектов и определения углового направления на объекты в реальном времени. Работа системы основана на разработанном методе обработки видеоизображений и идентификации объектов. Приведены результаты исследований макета.

Ключевые слова: система распознавания объектов, бортовая система технического зрения, распознавание объектов в реальном времени.

Введение

Классическая бортовая система технического зрения, предназначенная для автономного управления в сложной, неопределенной и быстроменяющейся обстановке, состоит из системы получения цифровых изображений наблюдаемых сцен в одном или нескольких диапазонах длин волн и системы обработки цифровых изображений и распознавания объектов на них. Авторами представлена система, предназначенная для автоматического обнаружения, распознавания объектов и определения углового направления на объекты поиска в реальном времени. Работа системы основана на разработанном авторами методе обработки видеоизображений и идентификации объектов.

МЕТОД ОБРАБОТКИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ

Обобщенная функциональная организация метода предусматривает следующую последовательность этапов [Прэтт, 1982]: предобработка и сегментация изображения; построение аналитического описания полученных образов объектов; классификация образов.

Данный метод может использоваться для распознавания объектов на изображениях любого диапазона длин волн при условии, что размеры объектов поиска на них будут не менее 8×8 пикселов.

Предобработка изображений осуществляется набором фильтров, конкретное содержание которого зависит от условий визирования сцены и объекта поиска.

Основная задача предобработки — повышение контраста объект поиска — фон и подавление шумов с целью обеспечения работы в любое время суток, всепогодности и всесезонности. Поэтому при выборе фильтров в набор руководствуются

Дмитриев Николай Иванович — заместитель главного конструктора, старший научный сотрудник, доктор технических наук.

Хрусталеv Андрей Алексеевич — начальник отдела, кандидат технических наук, e-mail: akhrust@niiis.nnov.ru.

Ляпин Александр Игоревич — начальник сектора, кандидат технических наук.

Суворов Евгений Юрьевич — научный сотрудник.

поддержанием баланса между общим временем предобработки и качеством отфильтрованных изображений.

Далее производится сегментация изображения сцены алгоритмом выделения однородных областей, который состоит из двух частей: алгоритма формирования штрихов одной строки и алгоритма формирования штриховых образов объектов. Данный алгоритм относится к алгоритмам сегментации с непосредственным поиском регионов и отличается значительным быстродействием [Ляпин, Суворов, 2006].

Сначала производится построчное (постолбцовое) сканирование изображения и проводится объединение соседних пикселей каждой строки в штрихи. Затем выполняется анализ штрихов, лежащих в соседних строках (столбцах), для последующего их объединения в штриховые объекты — образы объектов на изображении анализируемой сцены. В качестве решающего правила для объединения можно использовать, например, сравнение абсолютной разницы средней яркости уже сформированной части штриха (объекта) и яркости текущего пиксела (штриха) с пороговой величиной. Предложенные алгоритмы инвариантны к тому, в каких диапазонах длин волн получены цифровые изображения сцены.

В ходе формирования массива штриховых объектов проводится предварительная фильтрация неинформативных объектов. При этом удаляются все штриховые объекты слишком малой (помехи) или слишком большой (элементы фона) площади для того, чтобы быть объектом поиска.

На этапе построения аналитического описания для каждого полученного на этапе сегментации образа рассчитывается набор признаков классификации (включая определение местоположения на цифровом изображении наблюдаемой сцены центра тяжести образа), основанных на группах моментов, форм, яркостей и топологии образов объектов.

В качестве классификационных признаков группы моментов используются семь инвариантов второго и третьего порядков. Группа форм представляет анализируемый образ по отношению к описанному вокруг него габаритному прямоугольнику, где используются отношения их пространственных характеристик. На основе признаков группы яркостей характеризуется средняя яркость анализируемого образа по отношению к средней яркости его окрестностей. Их определение отличается алгоритмом построения данной окрестности. Топологические свойства необходимы для групповой оценки нескольких образов. Характер вычислений основан на анализе средних значений яркости совокупности образов, объединенных по определенному принципу. Отличительной чертой данных признаков принимается инвариантность их значений к операциям масштабирования и поворота и устойчивость к яркостно-геометрической изменчивости наблюдаемых объектов и сцен.

Выбор набора признаков из полного перечня разработанных для непосредственного использования на этапе классификации, проводится под конкретный объект поиска и зависит от его типа и характера окружения.

На этапе классификации образов принимается решение о принадлежности образа к классу объекта. В предлагаемой системе классификация реализуется двухуровневым методом — проведение основного этапа и подэтапа уточняющей классификации. На основном этапе используется нейросетевое обнаружение, на подэтапе — обнаружение с помощью преобразования Уолша-Адамара.

Основной этап, вследствие параллелизма внутренней архитектуры построения нейронных сетей, обеспечивает работу в масштабе реального времени и обладает

универсальными аппроксимирующими свойствами. При этом в качестве нейросетевого классификатора используются полносвязные нейронные сети с архитектурами типа трехслойного персептрона.

Результатом основного этапа классификации считается обнаружение цели или выделение выборки целеподобных образов. В последнем случае обнаруженные цели производится на подэтапе уточняющей классификации.

Для решения задач подэтапа предлагается использование унитарных преобразований Уолша – Адамара, учитывающих яркостную структурированность изображения. Вычислительная сложность преобразования Уолша – Адамара характеризуется выполнением только операций суммирования, что обеспечивает быстроедействие решения задачи подэтапа.

Результатом предложенного метода обработки видеоизображений и идентификации объектов будет определение углового направления на объект поиска в реальном времени, которое осуществляется путем:

- обнаружения объекта поиска;
- определения местоположения (координат) пиксела на цифровом изображении наблюдаемой сцены, соответствующего центру тяжести обнаруженного объекта;
- определения углового направления на цель путем пересчета в угловые размеры местоположения пиксела, соответствующего центру тяжести объекта поиска, так как размеры цифрового изображения наблюдаемой сцены определяются углом зрения системы его получения.

Система распознавания объектов, использующая данный метод обработки видеоизображений и идентификации объектов, обеспечит работу бортовой системы технического зрения в реальном времени. При этом данная система распознавания объектов будет обладать устойчивостью к яркостно-геометрической изменчивости наблюдаемых объектов и сцен, что обеспечивает работу в любое время суток, всепогодность и всесезонность.

МАКЕТ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

На основе предложенного метода разработан макет системы распознавания объектов (СРО), состоящий из устройства предварительной обработки (УПО), устройства принятия решения (УПР) и контроллера периферии (КП).

Устройство предварительной обработки осуществляет предобработку входного изображения набором фильтров предобработки, сегментацию с формированием образов объектов и определением их центров тяжести, построение аналитического описания образов. Состав аналитического описания включает в себя 25 признаков классификации.

Устройство принятия решений предназначено для классификации образов объектов и принятия соответствующих решений. В УПР на первом этапе проводится нейросетевая классификация образов объектов для идентификации объекта поиска. При этом используются полносвязные нейронные сети с архитектурой типа трехслойный персептрон. Если во время нейросетевой классификации были классифицированы кроме нужного объекта несколько подобных образов, то задействуются алгоритмы второго этапа, выполняющие расчет характеристического векторного расстояния между изображениями образа и эталона.

После идентификации информация о объекте поиска передается из УПР в УПО, где определяется угловое направление на объект.

Контроллер периферии обеспечивает обмен данными между системой получения цифровых изображений, УПО, УПР.

В макете системы распознавания объектов УПО реализовано в двухпроцессорном варианте (на сигнальных процессорах Л1879ВМ1 с тактовой частотой 40 МГц) с общей памятью. УПР выполнено на ПЛИС Xilinx XC2V3000E. Контроллер периферии реализован на ПЛИС Xilinx XC2V500E.

В качестве анализируемой сцены использовался неоднородный городской пейзаж. Проверка работоспособности СРО показала, что при отключенной уточняющей классификации искомый объект обнаруживается в 80% случаев, в 5% происходит его пропуск и ~15% составляет ложный захват. При использовании уточняющей классификации искомый объект правильно определяется в ~95% случаев. Общее время работы СРО, затрачиваемое на обработку одного цифрового изображения форматом 128×64, в среднем составляет ~0,3 с, т. е. обеспечивается работа в реальном времени. Масса макета СРО — 150 г, объем — 0,1 дм³, потребляемая мощность — 10 Вт.

Выводы

Рассмотренная система распознавания объектов, обеспечивающая работу бортовой системы технического зрения в реальном времени, предназначена для автоматического обнаружения, распознавания объектов и определения углового направления на них. Использование в СРО предложенного авторами метода обеспечивает устойчивость к яркостно-геометрической изменчивости наблюдаемых объектов и сцен, а также работу в любое время суток, всепогодность и всесезонность.

К достоинствам макета СРО можно отнести: высокую вероятность правильного обнаружения и распознавания цели, малые массогабаритные характеристики, работу в реальном времени.

Литература

- [Ляпин, Суворов, 2006] *Ляпин А. И., Суворов Е. Ю.* Алгоритм сегментации, инвариантный к условиям освещенности // Тр. 7-й Международ. научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж: НПФ «Саквое», 2006. Т. 3. С. 1995–1999.
- [Прэтт, 1982] *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений. В 2-х кн. М.: Мир, 1982.

OBJECTS RECOGNITION SYSTEM ENSURING FUNCTIONING AN ONBOARD VISION IN REAL TIME

N. I. Dmitriev, A. A. Khrustalev, A. I. Lyapin, Ye. Yu. Suvorov

FSUE "FRPC NIIS named after Yu. Ye. Sedakov", Nizhny Novgorod

The objects recognition system, intended for autodetect, recognition of objects and definition of an angular direction on objects in real time is observed. System work is based on the developed processing method of video images and identification of objects. Results of researches of the mockup are resulted.

Keywords: objects recognition system, onboard vision system, recognition of objects in real time.

Dmitriev Nicolay Ivanovich — deputy chief constructor, doctor of technical sciences, senior scientist.
Khrustalev Andrey Alexeevich — head of department, PhD, e-mail: akhrust@niiis.nnov.ru.
Lyapin Alexandr Igorevich — head of department, PhD.
Suvorov Yevgeny Yurevich — research engineer.

Секция 2

ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УЛУЧШЕННОГО ВИДЕНИЯ

О. В. Выголов, Ю. В. Визильтер

ФГУП «ГосНИИ Авиационных систем» (ФГУП «ГосНИИАС»), Москва

Статья посвящена разработке элементов авиационной системы «улучшенного видения» (СУВ). Описаны основные результаты, полученные ФГУП «ГосНИИАС» в кооперации с рядом отечественных предприятий в области создания прототипа отечественной СУВ нового поколения на платформе интегрированной модульной авионики (ИМА). Приведены рекомендации по составу и размещению датчиков СУВ на борту самолета, предложены критерии оценки условий видимости взлетно-посадочной полосы (ВПП) на цифровых изображениях, описаны алгоритмические модули обработки видеоинформации, обеспечивающие информационную поддержку СУВ. В заключении приведены основные направления дальнейших работ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-08-01114-а).

Ключевые слова: авиационные системы улучшенного видения, интегрированная модульная авионика, комплексирование информации, многоспектральные изображения.

Введение

Потеря экипажем ситуационной информированности при заходе на посадку и посадке в сложных метеоусловиях — одна из основных причин авиационных происшествий и катастроф. В связи с этим крайне актуальна задача создания авиационной системы технического зрения, предоставляющей экипажу возможность «улучшенного видения» закабинной обстановки на основе обработки информации от датчиков различных спектральных диапазонов (прежде всего, телевизионного и инфракрасного), а также навигационных датчиков.

На сегодняшний день предлагаемые на рынке сертифицированные коммерческие авиационные СУВ, например, производства компаний Rockwell Collins Inc. (США), Thales (Франция), СМС Electronics Inc. (Канада), в основном представляют собой простые неинтеллектуальные системы «датчик-дисплей», обеспечивающие лишь передачу на индикатор в кабине изображения, полученного напрямую от датчиков.

ФГУП «ГосНИИАС» в рамках работ по созданию интегрированной модульной авионики (ИМА) впервые в России инициировал работы по созданию прототипа отечественной СУВ нового поколения для самолетов гражданской авиации, отличительными особенностями которой должны стать модульная архитектура и более высокая по сравнению с существующими зарубежными аналогами степень интеллектуализации.

К основным направлениям исследований по разработке такой СУВ следует отнести: обоснование общего облика СУВ, получение экспериментальных регистраций при помощи бортового и наземного многоспектральных регистрирующих

Выголов Олег Вячеславович — начальник сектора, кандидат технических наук, e-mail: o.vygodov@gosniias.ru.

Визильтер Юрий Валентинович — начальник лаборатории компьютерного машинного зрения, старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук, e-mail: viz@gosniias.ru.

комплексов (МРК), разработку принципов комплексирования видеоинформации, разработку алгоритмического и программного обеспечения (ПО) и их отработку методами математического и полунатурного моделирования, использование специальных технологий разработки и тестирования модульного программно-алгоритмического обеспечения: разработку принципов интеграции и отработку взаимодействия с другими датчиками и системами на борту самолета.

В статье описаны основные результаты, полученные ФГУП «ГосНИИАС» совместно с рядом соисполнителей в рамках перечисленных направлений исследований, а также сформулированы цели дальнейших работ по тематике.

1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВУ И РАЗМЕЩЕНИЮ ДАТЧИКОВ СУВ НА БОРТУ САМОЛЕТА

В рамках работы сформулированы рекомендации по составу и размещению датчиков СУВ на борту самолета, а также предложена методика проведения летных экспериментов с использованием различных типов носителей и специального метрологического обеспечения, в частности, тестовых мишеней (съёмочных объектов с известными оптическими и температурными исходными характеристиками) и датчиков измерения параметров атмосферы.

На этапе получения экспериментальных регистраций и исследования функций СУВ наиболее предпочтительным вариантом представляется использование трехканальной регистрирующей системы, состоящей из трех синхронизированных по полям зрения и циклограммам работы датчиков разного диапазона (ТВ, ИК 3...5 мкм и ИК 8...14 мкм), установленных на единой стабилизированной платформе, обладающей 3-мя степенями свободы.

В качестве такой системы была выбрана авиационная гиросtabilизированная наблюдательная система UltraForce 350 производства компании FLIR Systems Polytech AB [FLIR Polytech], к важным преимуществам которой можно отнести: платформу с активной гиросtabilизацией; возможность юстировки системы на аппаратном уровне; корпус из композитных материалов, обеспечивающий наименьший вес и высокую прочность системы: крепление подвески, разработанное специально для установки на борт летательного аппарата; наличие GPS.

Предпочтительный вариант размещения регистрирующей системы — нижняя часть корпуса самолета, что обеспечивает лучшие условия видимости при посадке (обзор с данной точки зрения даже лучше, чем обзор из кабины летчика, поскольку поле зрения не ограничено снизу носовой частью самолета).

Разработанное служебное ПО в части исследования результатов летных экспериментов включает базу данных экспериментальных регистраций, а также специализированное модульное ПО для их калибровки, взаимной привязки и автоматизированного анализа.

2. ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ВИДИМОСТИ ВПП НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Для оценки условий видимости ВПП на цифровых изображениях предложен ряд критериев:

- линейное разрешение (F_h), определяемое как количество линий (строк) цифрового изображения, помещающихся в видимый вертикальный размер объ-

екта (ВПП). Численный показатель F_h — расстояние в пикселях по вертикали между верхней и нижней границами ВПП на изображении.

- выраженность контуров (F_σ) в исследуемом фрагменте изображения, содержащем изображение объекта (ВПП). Численное значение F_σ определяется как среднеквадратическое отклонение (с. к. о.) гистограммы модуля градиента яркости пикселей изображения. Фрагмент изображения с ВПП имеет большое количество точек перепадов яркости (краевых точек), что может служить отличительной особенностью ВПП от других наземных объектов. За счет большего количества краевых точек, с. к. о. гистограммы модуля градиента такого фрагмента изображения будет выше, чем у фрагментов, содержащих более мелкие объекты. Для оценки модуля градиента к изображению применяется фильтр Собела [Гонсалес, Вудс, 2005].

- яркостная отделимость (F_{bin}) пикселей области объекта (ВПП) от пикселей окружающего фона в исследуемом фрагменте изображения. Для получения численного значения F_{bin} используется анализ яркостной гистограммы изображения методом Отсу [Otsu, 1979]. Гистограмма фрагмента изображения, содержащего образ ВПП, должна иметь бимодальную форму и соответственно высокую степень разделимости.

Разработано модульное ПО, реализующее алгоритмы оценки условий видимости ВПП согласно предложенным критериям.

3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННУЮ ПОДДЕРЖКУ СУВ

Разработаны алгоритмические модули обработки видеоинформации, обеспечивающие информационную поддержку СУВ.

- Улучшение ТВ изображений на основе модифицированного алгоритма типа Retinex [Land, McCann, 1971], реализующего модель зрения, основанную на упрощённой имитации биологической структуры зрительного тракта животных. Основное преимущество этой модели — механизм динамической компрессии освещённости изображения, позволяющий регистрировать яркие и затемнённые области изображения, которые теряются при переходе от естественного динамического диапазона к фиксированному диапазону цифрового изображения.

- Комплексирование изображений, полученных в ТВ, ИК 3...5 мкм, ИК 8...14 мкм диапазонах на основе морфологического подхода Пытьева [Пытьев, 1983] с использованием гистограммной сегментации на этапе получения предварительных данных.

- Повышение информативности изображений на основе метода «суперразрешения», позволяющего получать изображения более высокого разрешения на основе серии изображений низкого разрешения. Источник дополнительной информации для суперразрешения — сдвиги изображения одного и того же объекта на последовательности кадров относительно некоторого опорного кадра за счет движения ЛА.

- Межкадровая стабилизация изображений, основанная на вычислении особых точек на каждом кадре и сопоставлении методом максимального правдоподобия этих точек с точками, найденными на предыдущем кадре. Под особыми точками на изображении понимаются обладающие большим контрастом

по сравнению со всеми соседними точками. Для поиска таких точек использует детектор Харриса [Harris, Stephens, 1988].

- Автоматическое обнаружение ВПП. Разработанный алгоритм позволяет решать данную задачу без опоры на текущую пилотажно-навигационную информацию и априорные картографические сведения об аэродроме и ВПП. Программная реализация алгоритма прошла отработку на платформе ИМА в составе наземного имитационного стенда.

Заключение

К основным результатам, полученным к 2011 г. в рамках работ по созданию прототипа отечественной авиационной СУВ, можно отнести следующее: определен конструктивный облик и выбрано аппаратное решение для бортового многоспектрального регистрирующего комплекса; разработано программно-алгоритмическое обеспечение для оценки условий видимости ВПП на цифровых изображениях; реализованы прототипы алгоритмических модулей обработки видеoinформации, обеспечивающие информационную поддержку систем улучшенного видения; разработан модуль обнаружения ВПП на видеоизображениях в виде ПО для платформы ИМА.

В 2011–2012 гг. предполагается: совершенствование алгоритмов интеллектуальной видеообработки; проведение летных и наземных экспериментов с использованием регистрирующей системы UltraForce 350 с целью создания базы многоспектральных видеопоследовательностей натуральных изображений земной поверхности в районе ВВП; создание, отработка и испытания летного прототипа СУВ на базе платформы ИМА; проработка возможностей международной сертификации создаваемой СУВ согласно требованиям документа [RTCA DO-315, 2008], регламентирующего разработку, сертификацию и эксплуатацию систем улучшенного видения.

Литература

- [Гонсалес, Вудс 2005] *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
- [Пытьев, 1983] *Пытьев Ю. П.* Морфологический анализ изображений // Докл. АН СССР. 1983. Т. 269. № 5. С. 1061–1064.
- [FLIR Polytech] FLIR Polytech. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.polytech.se/>.
- [Harris, Stephens, 1988] *Harris C., Stephens M.* A combined corner and edge detector // Proc. 4th Alvey Vision Conference. 1988. P. 147–151.
- [Land, McCann, 1971] *Land E. H., McCann J. J.* Lightness and Retinex theory // J. Optical Soc. of America. 1971. V. 61. P. 1–11.
- [Otsu, 1979] *Otsu N.* A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. 1979. V. SMC-9. N. 1b.
- [RTCA DO-315, 2008] RTCA DO-315 “Minimum Aviation System Performance Standard (MASPS) for Enhanced Vision Systems, Synthetic Vision Systems, Combine Vision Systems and Enhanced Flight Vision Systems”. RTCA, Inc. 2008 [Электрон. текст]. Режим доступа: <http://infostore.saiglobal.com/store/Details.aspx?productID=1113515>.

DEVELOPMENT OF AN ENHANCED VISION SYSTEM FOR AVIATION

O. V. Vygodov, Yu. V. Vizilter

FGUP "State Research Institute of Aviation Systems" (FGUP "GosNIIAS"), Moscow

The paper describes the development of an enhanced vision system (EVS) for aviation. The main results obtained by FGUP "GosNIIAS" in cooperation with several domestic enterprises are represented in the field of EVS prototype development based on a next-generation platform for integrated modular avionics (IMA). The paper describes the recommendations for sensors configuration and placement on an aircraft, the proposed criteria for runway visibility evaluation on digital images, the developed algorithmic modules of video processing for EVS informational support. In conclusion the basic directions for further work are formulated.

This project is supported by RFBR grant N. 11-08-01114-a.

Keywords: enhanced vision systems for aviation, integrated modular avionics, data fusion, multispectral images.

Vygodov Oleg Vyacheslavovich — head of group, PhD, e-mail: o.vygodov@gosniias.ru.

Vizilter Yuriy Valentinovich — head of laboratory for computer and machine vision, doctor of sciences, e-mail: viz@gosniias.ru.

ОБЗОРНО-ПАНОРАМНАЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЯ И ОБНАРУЖЕНИЯ ДЛЯ МОБИЛЬНОЙ НАЗЕМНОЙ ТЕХНИКИ

А. В. Бондаренко¹, И. В. Докучаев¹, А. В. Рода²,
Я. Я. Хаджиева²

¹ ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ», Москва

² ООО «НТЦ «ВЕРСИЯ», Климовск, Московская область

Изложены технические решения по созданию обзорно-панорамной оптико-электронной системы (ОПОЭС) наблюдения и обнаружения высокого разрешения, которая устанавливается на транспортные средства, применяемые силовыми структурами. Приводится описание конструкции и принципиальных схем. Изложены инновационные решения, обеспечивающие панорамное изображение в широком диапазоне освещенностей, интеллектуальную настройку оптимального уровня цифрового видеосигнала для обнаружения угрозы нападения — вспышки выстрела гранатомёта.

Ключевые слова: цифровая видеокамера, мультиплексор, обнаружение вспышки выстрела, оптико-электронная аппаратура разведки.

Обзорно-панорамная оптико-электронная система наблюдения и обнаружения для мобильной наземной техники предназначена для установки на наземные транспортные средства, применяемые в жестких условиях эксплуатации в интересах силовых структур.

ОПОЭС состоит из:

- шести цифровых видеокамер **RT-1000DC**, обеспечивающих панорамный обзор от 0 до 360° по азимуту, с встроенной функцией управления диафрагмой и установкой светофильтра для оптимизации цифрового видеосигнала в условиях освещенности от 10^{-2} до 10^5 лк;
- устройства коммутации и управления видеокамерами (мультиплексор **RT-106MX**), с функцией автоматического обнаружения выстрелов гранатомётов и разрывов по вспышке;
- видеоконтрольного устройства (монитора);
- пульта управления.

В ОПОЭС шесть видеокамер **RT-1000DC** через интерфейс Fibber Channel подключаются к цифровому мультиплексору **RT-106MX**, который управляет работой видеокамер. Цифровой мультиплексор обрабатывает входные цифровые потоки данных от видеокамер и формирует один выходной цифровой поток в соответствии с выбранными установками.

Видеоизображение окружающей обстановки, формируемое мультиплексором, может содержать либо видеоизображение от одной из видеокамер, либо несколько изображений: от трёх видеокамер, направленных в переднюю полусферу; от трёх видеокамер, направленных в заднюю полусферу, и от всех шести видеокамер.

Бондаренко Андрей Викторович — генеральный директор, e-mail: raster-msk@mtu-net.ru.

Докучаев Игорь Владимирович — главный специалист, e-mail: raster-msk@mtu-net.ru.

Рода Андрей Васильевич — заместитель директора, кандидат технических наук, e-mail: ntcversia@mail.ru.

Хаджиева Яха Яхьяевна — директор, кандидат технических наук, e-mail: ntcversia@mail.ru.

Алгоритм обнаружения выстрелов гранатометов и разрывов построен на принципе анализа межкадровой разницы сигналов, спектро-энергетических, геометрических и временных характеристик вспышки выстрела.

Принципиально новая задача при разработке ОПОЭС — обеспечение возможности оптико-электронной разведки для защиты техники и личного состава от стрелкового оружия ближнего боя и гранатомётов путём:

- формирования изображения окружающей обстановки на видеоконтрольном устройстве с целью ведения наблюдения и обнаружения угрозы или факта нападения на защищаемую колонну в заданных секторах обзора;
- автоматического обнаружения вспышки выстрелов гранатомётов по цифровым изображениям, формируемым видеокамерами;
- реализации различных режимов функционирования, работы в разных условиях наблюдения.

Одна из особенностей построения ОПОЭС — обоснование оптимальной конструкции аппаратуры с учётом ограничений по массогабаритным характеристикам, энергопотреблению, возможностям размещения исполнительных устройств и обеспечение решения ряда проблемных вопросов, связанных с испытаниями, оценкой технических, эксплуатационных и боевых возможностей, живучестью, надёжностью.

Инновационные решения. При разработке ОПОЭС предложены, теоретически и экспериментально обоснованные новые технические решения. Аппаратура оптико-электронной разведки имеет оригинальную оптическую схему видеокамер, обеспечивающую панорамное изображение с высоким разрешением в широком диапазоне освещённостей, от глубоких сумерек до яркого солнечного дня. Видеокамеры имеют интеллектуальную настройку оптимального уровня цифрового видеосигнала, сигнала для обнаружения вспышки выстрела гранатомёта на



Рис. 1. Видеокамера и мультиплексор в защищенных корпусах

дальности 300 м и обеспечения помехозащищенности. В цифровом мультиплексоре организована аппаратная цифровая обработка входных цифровых потоков данных от видеокамер и формируется один выходной цифровой поток в соответствии с выбранными установками для выбора направлений обзора. В мультиплексоре реализован алгоритм обнаружения выстрелов гранатомётов и разрывов, построенный на принципе анализа межкадровой разницы сигналов, спектроэнергетических, геометрических и временных характеристик вспышки выстрела, а также алгоритм анализа ложных сигналов. При реализации алгоритма в цифровом мультиплексоре организована параллельная и конвейерная обработка изображений от 6 видеокамер в реальном времени и аппаратно реализованная на ПЛИС фирмы Altera.

На рис. 1 показаны внешний вид видеокамеры и мультиплексора.

Основной оптико-электронный элемент видеокамеры RT-1000DC — цифровая камера RT-1000DC-4.1.

Основные технические характеристики цифровой камеры RT-1000DC-4.1

- Пространственное разрешение — 1024×1024, 1024×512 — с биннингом по строкам;
- размер пикселя — 12,8×12,8 мкм;
- отношение сигнал/шум — не хуже 72 дБ;
- глубина оцифровки — 14 бит @ 65 МГц, адаптивная настройка на динамический диапазон ПЗС процессора;
- формат представления выходных данных — 1024×1024×12, 1024×1024×8 бит;
- количество яркостных градаций— 4096;
- пороговая чувствительность — 10^{-5} лк при отношении сигнал/шум, равном 1;
- синхронизация — внутренняя и внешняя — по триггеру с возможностью работы в режиме Master-Slave;
- размер внутренней оперативной памяти — 16 МБ;
- видео выход на CCIR или RGB TFT монитор;
- частота передачи кадров — 25 кадров/с, 50 — в режиме биннинга;
- выходной цифровой поток — до 1 Гбит/с;
- потребление — 5 Вт;
- интерфейс — Fiber Channel по витым парам или коаксиальному кабелю (опция — одномодовое оптоволокно);
- встроенный мониторинг температуры — (–55...+125) °С,
- диапазон рабочих температур — (–40...+70) °С.

Структурная схема цифровой камеры RT-1000DC-4.1 показана на рис. 2.

Мультиплексор RT-106MX (рис. 3) сложный электронный прибор, размещаемый, конструктивно выполненный в виде модуля прямоугольной формы, внутри которого размещена высокопроизводительная электронная плата.

Мультиплексор обеспечивает:

- коммутации цифровых изображений, формируемых шестью видеокамерами;
- коммутации сигналов управления видеокамерами, поступающих от аппаратуры управления и индикации по интерфейсу RS-232, и синхронизации работы видеокамер по кадровому синхроимпульсу;

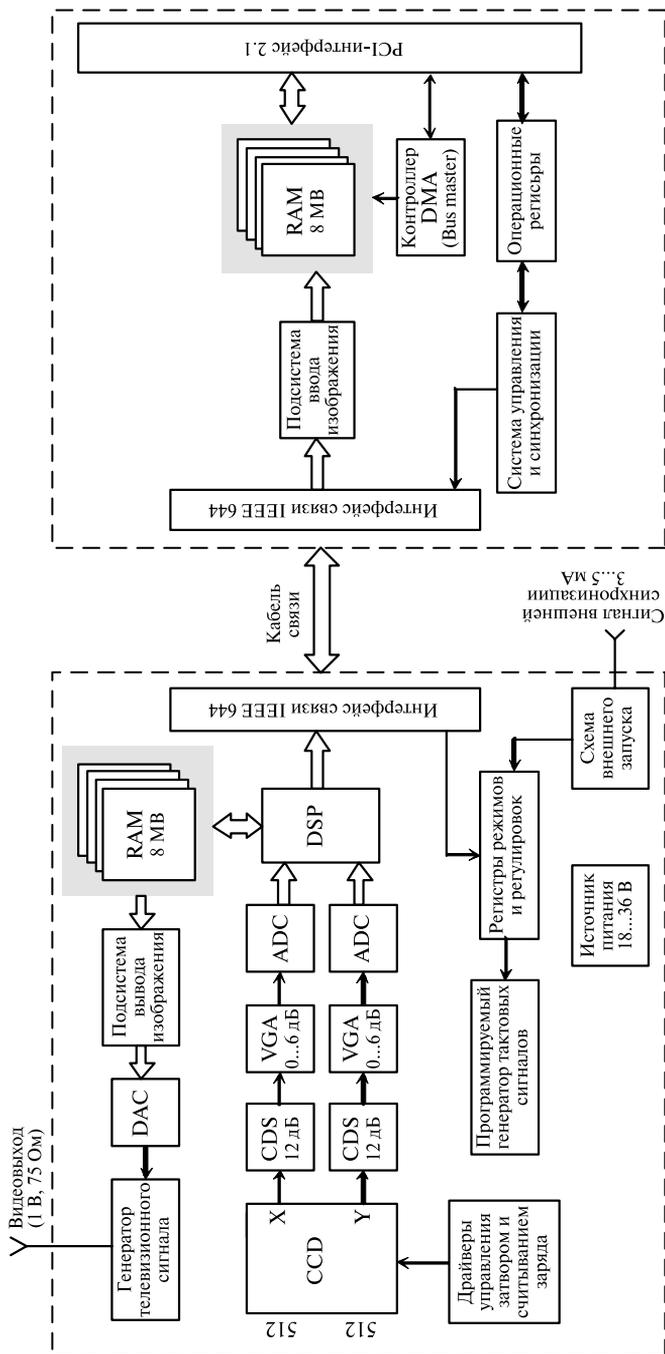


Рис. 2. Структурная схема цифровой камеры RT-1000DC-4.1



Рис. 3. Печатная плата мультиплексора RT-106MX

- формирование изображения, поступающего на экран видеомонитора и состоящего из одного, либо из нескольких изображений от шести видеокамер;
- «замораживание» кадра изображения, в котором обнаружена вспышка выстрела от гранатомета, по сигналу тревоги, выдаваемому соответствующей видеокамерой;
- формирование и передачи сигналов тревоги от видеокамер в аппаратуру управления и индикации;
- автоматическую загрузку настроек видеокамер по умолчанию начального тестирования и непрерывного контроля работоспособности всех видеокамер;
- сохранение во внутренней памяти изображений с видеокамер по сигналу тревоги, или команде оператора;
- передачу запомненных изображений по интерфейсу RS-232 на внешний компьютер.

Литература

- [Бондаренко и др., 2004] Бондаренко А. В., Докучаев И. В., Князев М. Г., Коноплянников Ю., Лазаренко Ю. М. Лазерная система автоматизации измерения габаритов сооружений на железных дорогах // Цифровая обработка сигналов. 2004. № 4. С. 36.
- [Бондаренко и др., 2006] Бондаренко А. В., Докучаев И. В., Князев М. Г. Расчёт пороговых значений потока излучений и освещённости для ПЗС матриц Kodak KAI-1003M, KAI-1020M и Philips FTF-3020M // Журн. CCTVfocus. 2006. № 4. С. 24.
- [Бондаренко и др., 2006] Бондаренко А. В., Докучаев И. В., Князев М. Г. Телевизионная видеокамера с цифровой обработкой в реальном времени // Соврем. электроника. 2006. № 3. С. 50.

- [Бондаренко и др., 2009] Бондаренко А. В., Докучаев И. В., Кораблёв О. И., Киселёв А. Б., Козлов О. Е., Котцов В. А., Бибринг Ж.-П., Фурмонд Ж. Ж. Телевизионные системы манипуляторного комплекса проекта «Фобос-Грунт» // Современ. проблемы определения ориентации и навигации космич. аппаратов: Сб. тр. Всерос. научно-технич. конф. Россия, Таруса, 22–25 сент. 2008. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 314–323 (Сер. «Механика, управление и информатика»).
- [Бондаренко и др., 2009] Бондаренко А. В., Докучаев И. В., Котцов В. А. Цифровая камера для регистрации атмосферных грозных разрядов // Миссия «Чибис-М»: Сб. тр. по результатам выездного семинара / Под ред. Р. Р. Назирова. Россия, Таруса, 24–27 февр. 2009. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 63. (Сер. «Механика, управление и информатика»).
- Техническая документация на цифровые ПЗС камеры и программное обеспечение. ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ». 2011. Москва. [Электронный текст]. Режим доступа: www.rastr.net.
- Российские инженеры создали новый комплекс РЭБ. 2009. [Электронный текст]. Режим доступа: <http://www.izvestia.ru/news/news210792>.

PANORAMIC OPTIKO-ELECTRONIC SYSTEM OF SUPERVISION AND DETECTION FOR THE MOBILE LAND TECHNICS

A. V. Bondarenko¹, I. V. Dokuchaev¹, A. V. Roda², Ya. Ya. Khadzhieva²

¹ “*Raster technology*”, Moscow

² “*NTC VERSIA*”, Klimovsk, Moscow region

In the article below one can find the technical decisions about optical and electronic system with round field of view which is used for reconnaissance. This system is installed on military vehicles. In the article one can also find a description of construction and principle circuits, innovative decisions, providing with panoramic view, wide-range illumination, digital processing for detection of a gun-shot.

Keywords: digital camera, commutator (multiplexor), detection of a gun-shot, reconnaissance device.

Bondarenko Andrey Viktorovich — director, e-mail: raster-msk@mtu-net.ru.

Dokuchaev Igor Vadimovich — main specialist, e-mail: raster-msk@mtu-net.ru.

Roda Andrey Vasil'evich — deputy director, candidate of science, e-mail: ntcversia@mail.ru.

Khadzhieva Yakha, director — candidate of science, e-mail: ntcversia@mail.ru.

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С СУПЕРВИЗОРНЫМ СЕТЕВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В. П. Андреев¹, В. Е. Пряничников²

¹ Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН), Международная лаборатория «Сенсорика» (МЛ «Сенсорика»), Москва

² Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН), Москва

В работе рассматривается технология передачи видеопотоков при построении сетевого супервизорного управления мобильных роботов с компенсацией запаздывания. Приведено описание способа представления данных и формирования экспертных схем, обеспечивающих сведение задачи интеллектуализации обработки данных и управления к построению некоторого класса конечных автоматов.

Работа частично поддержана РФФИ (проект № 10-07-00612а).

Ключевые слова: системы технического зрения, мобильные роботы, экспертные системы в управлении с использованием дистанционных сенсоров.

В последнее время среди разработчиков мобильных роботов (МР) сформировалось понимание, что достижения современных технологий в большинстве случаев не позволяют создавать полностью автономные системы, оставаясь в рамках приемлемой стоимости. Поэтому всё большее внимание уделяется супервизорному управлению МР, при котором лишь часть функций выполняется автономно с помощью бортовых систем, а конечный анализ обстановки, принятие решений и выдача отдельных команд на включение тех или иных программ управления возлагается на оператора.

Отличительная особенность таких систем — наличие двух компонент — коммуникационной среды и удалённого интерфейса представления данных, ориентированного на человека-оператора. Коммуникационная среда может вносить существенные задержки, помехи и искажения. При этом полнота и достоверность отображения информации считается необходимым условием минимизации ошибок при формировании целей управления. С позиции конструирования СТЗ полнота данных обеспечивается возможностью полного обзора места действия, а достоверность информации определяется как техническими характеристиками сенсоров, так и способами извлечения информации.

При использовании МР для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, например техногенных катастроф, часто возникает необходимость удаленного управления группой роботов из единого центра, куда должна стекаться вся получаемая сенсорами МР информация. Центр управления может располагаться за много километров от зоны работ.

Андреев Виктор Павлович — заместитель директора по научным вопросам, старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: andreev@npprema.ru.

Пряничников Валентин Евгеньевич — старший научный сотрудник, доктор технических наук, профессор, e-mail: val-rover@rambler.ru.

Решение обозначенных проблем лежит в использовании сетевых технологий. При таком подходе существенно, что системы МР оказываются мобильными узлами локальной вычислительной сети (ЛВС). Это требует проведения исследований по определению оптимальной структуры ЛВС и параметров устройств, её формирующих. Настоящая работа посвящена исследованию возможности объединения в единую вычислительную сеть управляемых многокамерных СТЗ, передающих на большие расстояния с мобильных систем многопотокное видео по радиоканалу в стандарте Wi-Fi. Предложена технология построения ЛВС, позволяющая организовать устойчивую передачу видеоданных одновременно с нескольких телекамер по радиоканалу в стандарте Wi-Fi, в том числе при отсутствии прямой радиовидимости. Разработанный интерфейс обеспечивает отображение со стандартной кадровой частотой полноформатных изображений одновременно с нескольких телекамер. Приведены результаты удаленного управления МР путем объединения через VPN-каналы в Интернете робототехнического оборудования, распределённого по разным городам.

Разработана и реализована концепция построения управляемых многокамерных систем технического зрения для МР с дистанционным и супервизорным управлением, которая позволила унифицировать функциональный состав таких систем, определить единые принципы их построения и обосновать технические требования к компонентам системы. Как результат, было разработано и изготовлено несколько комплектов СТЗ для робототехнических комплексов МЧС — шведских роботов BROKK-110D и BROKK-330. Каждый имеет в своем составе четыре бортовые телекамеры (одна из которых — скоростная купольная) и две выносные — также скоростные купольные телекамеры. Все основные компоненты СТЗ объединяются с пультом управления в единую ЛВС посредством радиоканала Wi-Fi. Разработано программное обеспечение (ПО), которое позволило устойчиво передавать многопотокное видео по радиоканалу на расстояние более 400 метров. Разработанная технология построения СТЗ позволила обеспечить устойчивый канал связи, даже при условии отсутствия прямой радиовидимости. Основываясь на тех же принципах, были разработаны и изготовлены автономные мобильные учебные роботы «Амур-5м, -5, -6, -7» и экспериментальный макет марсохода, оснащенные развитой сенсорной системой (одометры, ультразвуковые сенсоры, телекамеры), и учебно-научные мобильные стенды (для ДвГТУ и ИНОТиИ при РГГУ). На основе сетевых технологий создан прототип виртуальной лаборатории, объединяющей по VPN-каналам в Интернете робототехнические стенды Международной лаборатории «Сенсорика» и ИПМ им. М. В. Келдыша (Москва), ИНОТиИ при Российском Государственном гуманитарном университете (РГГУ) (Москва), ИАПУ ДВО РАН (Владивосток).

Обработка показаний всех сенсорных и управляющих устройств для работы в полуавтоматическом режиме состоит в следующем. Данные записываются в шлейфы, составляющие так называемое операционное пространство (векторное поле): $Q = Me(i, j) := \langle z, \Psi m(X_s), \Psi m(U) \rangle$, где Me — двумерный шлейф (своего рода карта), который совмещает данные о решениях (об управляющих сигналах U) и измерениях (сенсорные данные — X_s), соотнесенных с дискретным временем. Номера элементов карты вычисляются с помощью процедур дискретизации по координатам X и Y : $i = \Psi m(Xn|x)$, $j = \Psi m(Xn|y)$, где $\Psi m(\cdot)$ — соответствующие правила пороговой дискретизации. Экспертные схемы, задающие поведение робота, имеют следующие разновидности (знак « \Rightarrow » — двухместный предикат):

- правила $\Psi_m(X_s)$ для классификации измерений в терминах

$\langle \text{«мало»/«норма»/«много»} \rangle;$

- продукционные правила для соотнесения действий и условий их применения (B, S) на основе вычисления экспертных *Оценок*:

Логическое выражение $(\Psi_m(X_s) = \dots, \text{окрестность } Me(i, j) = \dots) \Rightarrow \text{Оценка};$

- построение нескольких сценариев, составленных из последовательностей выражений вида:

(действие B, измерение S): $\langle (B, S), Me(i, j) \rangle, \dots;$

- правила свертки G всех оценок, входящих в сценарий для выбора лучшего сценария по $\max G(\text{Оценок})$, где «Оценка» — целочисленная мера применимости действий в конкретных условиях Me в окрестности (i, j) -положения робота с фактическими координатами (x, y) .

Предложенная технология описания сложного поведения мобильных роботов в заранее неизвестной среде показала свою эффективность в различных экспериментах [Пряничников, 2008]. Она стала основой для построения нового типа самоорганизующихся мехатронных систем (можно сравнить с более ранней работой для внутрицехового транспорта [Katalinic, 1990]).

Литература

[Пряничников, 2008] *Пряничников В. Е.* Алгоритмическое обеспечение дистанционных сенсоров мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление, 2008. № 10. С. 10–21. ISSN 1684-6427.

[Katalinic, 1990] *Katalinic B.* Industrieroboter und flexible Fertigungssysteme für Drehteile. 1990, VDI-Verl. Dusseldorf. 246 p.

COMPUTER VISION FOR MOBILE ROBOTS WITH SUPERVISION NET CONTROL

V. P. Andreev¹, V. E. Pryanichnikov²

¹ *Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences
(KIAM Russian Academy of Sciences), “Sensorika” International Laboratory
(IL “Sensorika”), Moscow*

² *Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences
(KIAM Russian Academy of Sciences), Moscow*

The work is considering the technology of the video transfers while supervision control of mobile robots with net-delays. Also is presented the way of data representation and expert schemes construction. That is transforming the problem of intellectualization of data processing and control to the construction a class of finite-automate.

Keywords: computer vision, mobile robots, expert systems for control with remote sensors feedback.

Andreev Victor Pavlovich — vice-director, PhD, senior scientist, e-mail: andreev@npptema.ru.
Pryanichnikov Valentin Evgenievich — professor, doctor of technical sciences, e-mail: andreev@npptema.ru.

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ С БОРТОВОЙ СИСТЕМОЙ ОБЪЕМНОГО ЗРЕНИЯ

А. В. Хрущ, Б. Б. Михайлов

Научно-учебный центр (НУЦ) «Робототехника» Московского государственного технического университета (МГТУ) им. Н. Э. Баумана

Рассматривается решение задачи управления мобильным роботом, предназначенным для автономного движения к целевой точке в среде с препятствиями. При этом информация о внешней среде поступает от бортовой системы трехмерного технического зрения.

Ключевые слова: мобильный робот, трехмерное техническое зрение, сегментация сцены, распознавание препятствий, планирование траектории, система управления.

В настоящее время активно расширяются области применения мобильной робототехники. Вместе с этим растут предъявляемые к роботам функциональные требования, для успешного выполнения которых система управления роботом должна обеспечивать обработку требуемых траекторий движения в условиях неопределенности среды. Все чаще предъявляются требования работы в неформализованной внешней среде, с исключением столкновений со стационарными препятствиями и подвижными объектами.

Выполнение подобных требований предполагает решения широкого круга задач. Отметим среди них следующие:

- получение информации о внешней среде и преобразование ее в форму, удобную для использования в целях управления;
- планирование движения робота;
- управление роботом.

В настоящей работе предлагается решение задачи объезда препятствий — управление движением мобильного автономного колесного робота, оснащенного системой трехмерного технического зрения (СТТЗ) [Володин и др., 2005] (рис. 1).

СТТЗ обеспечивает сбор координат точек в рабочей зоне мобильного робота (МР). Таким образом, исходными данными, которые поступают на вход разработанного алгоритма, считаются число точек и их пространственные координаты. Каждая точка — это вершина элементарных треугольников, с помощью которых описываются все объекты сцены [Володин, 2009].

Разработанный алгоритм распознавания и определения параметров препятствий на сцене подробно рассмотрен в статье [Хрущ, 2010]. Процесс обработки сцены состоит из 5 этапов, среди которых важнейшие — сегментация сцены и распознавание препятствий. Цель сегментации — разбиение исходного неструктурированного множества точек на непересекающиеся подмножества. Используется один из подходов, который заключается в разбиении сцены на плоские сегменты в соответствии с разработанными критериями. Они позволяют разделить все треугольники исходной сцены на три класса.

Хрущ Александр Владимирович — инженер, e-mail: mailavkh@yandex.ru.

Михайлов Борис Борисович — доцент, кандидат технических наук, e-mail: robot@bmstu.ru.

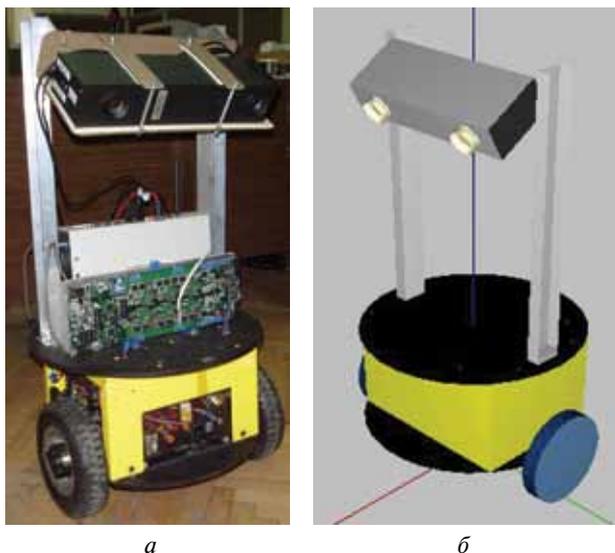


Рис. 1. Мобильный робот с СТТЗ: *а* — лабораторный робот; *б* — 3D-модель робота для отладки алгоритмов управления

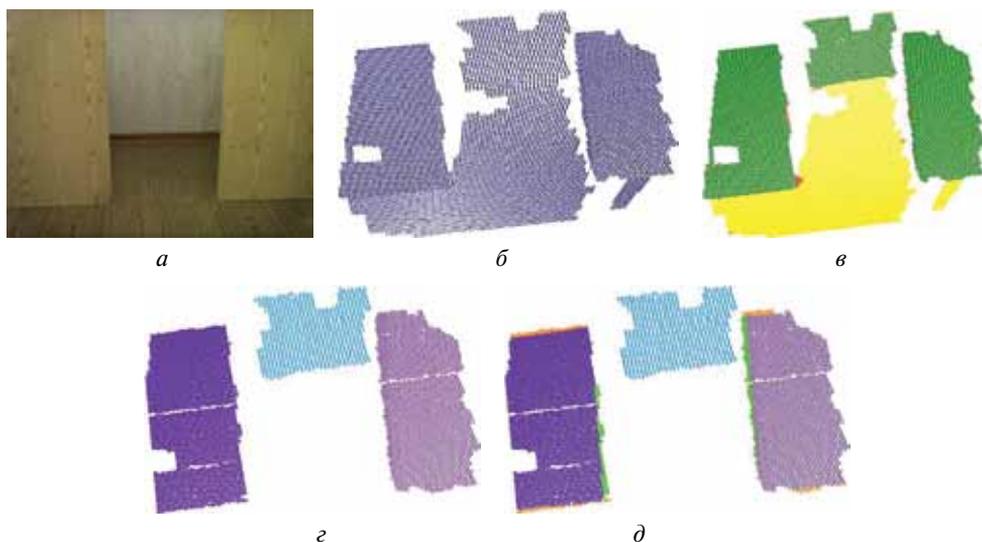


Рис. 2. Пример анализа 3D-сцены: *а* — исходное изображение; *б* — изображение СТТЗ; *в* — сегментация 1 этап; *г* — сегментация 2 этап; *д* — выделение границ

Некоторые результаты работы разработанного алгоритма показаны на рис. 2: Остановимся подробнее на задаче управления МР. Для организации управления необходимо проложить траекторию в обход препятствия. В качестве исходного алгоритма поиска пути в точку был выбран A* как наиболее быстрый [Алгоритм поиска, 2010]. Для проведения исследований был разработан 3D-симулятор с использованием открытой графической библиотеки OpenGL (рис. 3).

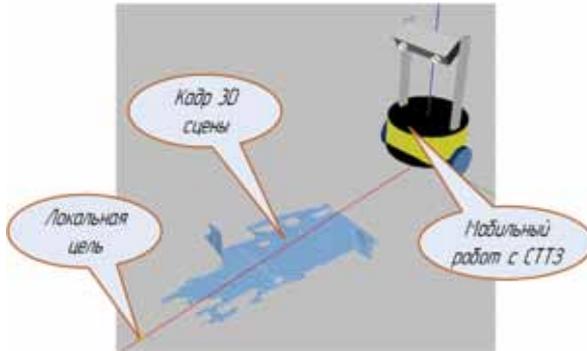


Рис. 3. 3D-симулятор

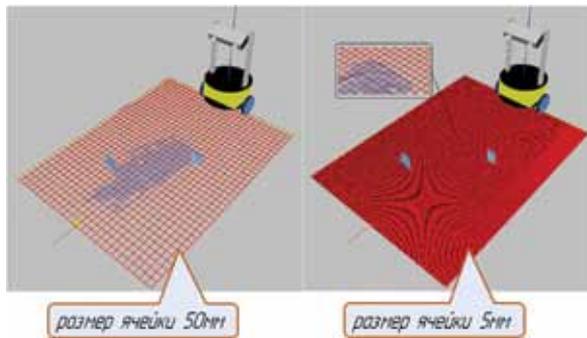


Рис. 4. Сетка на области 1400×1800 мм

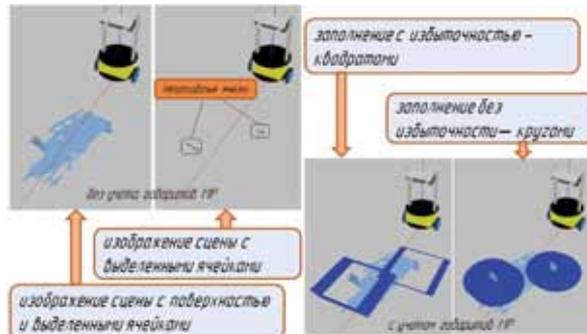


Рис. 5. Выделение непроходимых ячеек

Для реализации алгоритма задались областью размером 1,4×1,8 м, по которой прокладывалась траектория (рис. 4). Вся область поиска была разделена на квадратные ячейки двух типов: проходимые и непроходимые (рис. 5). В результате работы алгоритма был получен кусочно-линейный путь, состоящий из коротких отрезков (рис. 6). Отметим, что для движения по этой траектории требуется постоянная коррекция курса. Поэтому необходима либо ее оптимизация, либо применение особого закона управления роботом.

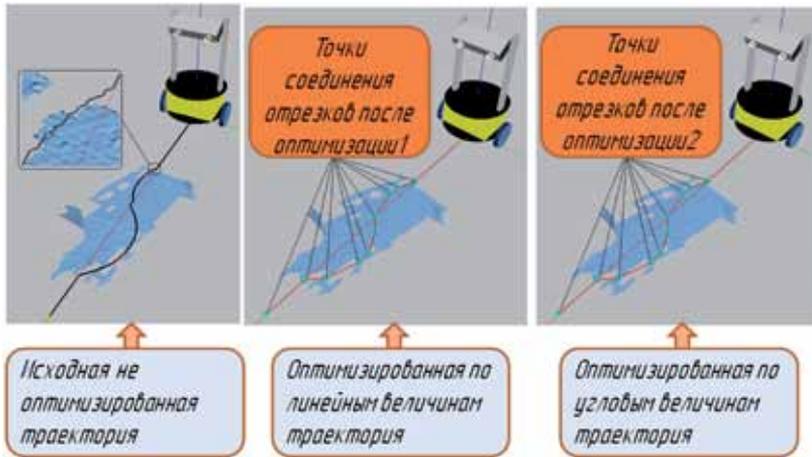


Рис. 6. Кусочно-линейный путь

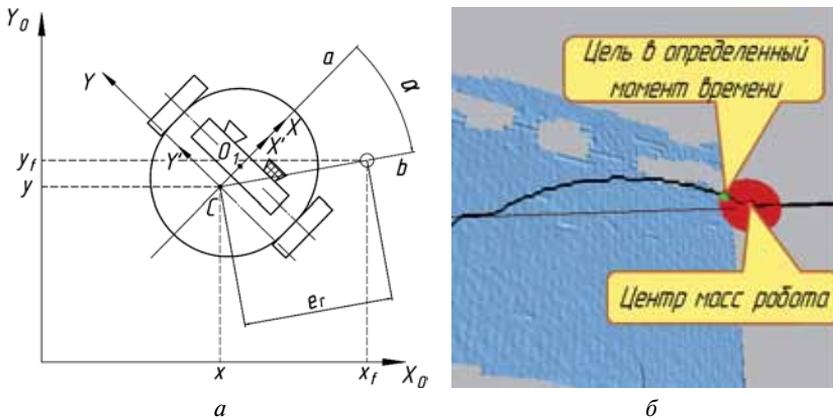


Рис. 7. Исходные данные для управления

Рассмотрим кусочно-линейную не оптимизированную траекторию (см. рис. 6). Суть принципа управления в том, что робот движется на бегущую точку, что позволяет плавно двигаться по неоптимизированной траектории. Для реализации метода в процессе движения определяется точка пересечения траектории и окружности постоянного радиуса с центром в центре масс робота (рис. 7). Таким образом, в качестве исходных данных для управления выступают координаты робота в глобальной системе координат (x, y) и локальная целевая точка (x_f, y_f) . В процессе движения в общем случае появляются ошибки управления по расстоянию $e_r = \sqrt{(x_f - x)^2 + (y_f - y)^2}$ и по углу $e_\alpha = \sin \left(\alpha - \arctg \left(\frac{y_f - y}{x_f - x} \right) \right)$. Следова-

тельно, компоненты вектора управления $\bar{u} = (U_R, U_L)^T$ должны изменяться таким образом, что бы минимизировать ошибки управления. Для поиска вектора управления $(U_R, U_L)^T$ использовался П-регулятор:

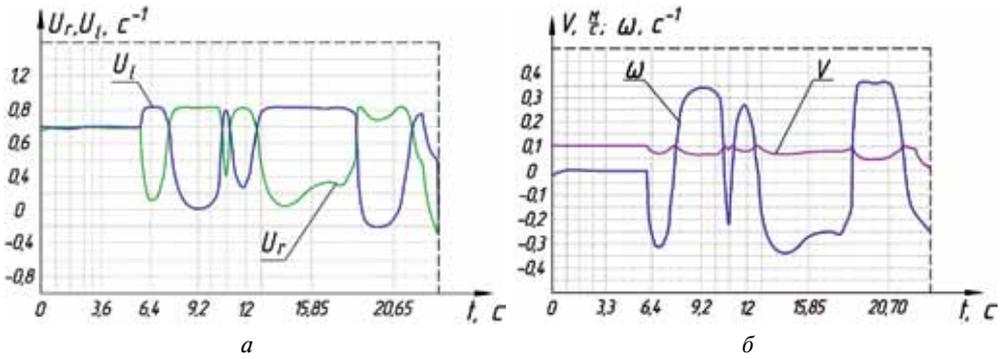


Рис. 8. Исследование системы управления движением: а — сигналы управления активными колесами; б — линейная и угловая скорость МР

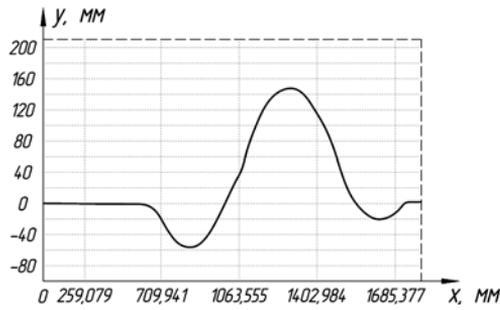


Рис. 9. Траектория движения МР

$$U_R = \frac{e_r k_r - e_\alpha k_\alpha}{2},$$

$$U_L = e_\alpha k_\alpha + U_R.$$

При этом коэффициенты вычислены из следующих соотношений:

$$k_r = 0,04 |1 - |e_\alpha||, \quad k_\alpha = 5,2 |1 - |e_\alpha||.$$

Из графиков (рис. 8) видно, что система управления формирует сигналы, которые МР в состоянии обработать, а полученная траектория (рис. 9) является приемлемой.

Таким образом, в работе представлен метод управления мобильным колесным роботом по данным с бортовой системы объемного зрения.

Литература

- [Володин и др., 2005] Володин Ю. С., Орлов А. В., Михайлов Б. Б. Калибровка системы трехмерного зрения со структурной подсветкой при помощи плоских объектов // Материалы 16-й Конф. «Экстремальная робототехника». СПб.: СПбГТУ, 2005. С. 314–322.
- [Володин, 2009] Володин Ю. С. Метод кодирования структурной подсветки для телевизионной системы объемного зрения робототехнического комплекса // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 35–42.

[Хрущ, 2010] Хрущ А. В. Алгоритм распознавания препятствий для системы трехмерного технического зрения мобильного робота: Экстремальная робототехника // Тр. Международ. конф. с элементами научной шк. для молодежи. СПб.: Политехника-сервис, 2010. С. 257–265.

[Алгоритм поиска, 2010] Алгоритм поиска // Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. 2010. Режим доступа: URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_поиска_A*.

MOBILE ROBOT CONTROL WITH ONBOARD 3D VISION SYSTEM

A. V. Khrushch, B. B. Mikhailov

Scientific-Educational Center “Robotic Engineering” of Moscow State Technical University named after N. E. Bauman

The decision of the control task of mobile robot designed for autonomous movement to the target point in an environment with obstacles. The information about the environment comes from the onboard system of three-dimensional vision.

Keywords: mobile robot, 3D vision, scene segmentation, detection of obstacles, trajectory planning, control system.

Khrushch Alexander Vladimirovich — engineer, e-mail: mailavkh@yandex.ru

Mikhailov Boris Borisovich — assistant professor, candidate of technical science, e-mail: robot@bmstu.ru.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СТЕРЕО ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Н. Н. Корнева, В. Н. Назаров

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва*

Визуализация научной информации космических проектов — один из наиболее доступных методов решения фундаментальных и прикладных задач исследований. В статье рассматривается возможность и целесообразность использования с этой целью технологии стерео визуализации. Данный способ позволяет повысить выразительность, а, следовательно, и информационную ценность изображения за счет более естественного (пространственного) отображения изучаемых объектов (явлений).

В результате наших работ мы считаем наиболее эффективным использование следующих методов стерео визуализации:

- анаглифический,
- эклипсный,
- поляризационный,
- растровый.

Выбор способа стерео визуализации зависит от требований, предъявляемых к качеству стереоизображения, доступности для конечного пользователя необходимых аппаратных средств. Так, анаглифический способ сепарации позволяет создать стереоэффект на бумаге. Вместе с тем выбор алгоритма преобразования стереопары в анаглифное изображение зависит от устройства вывода. Существенный недостаток анаглифического способа сепарации — ограничения в подборе цветов объекта.

Реализация эклипсного, поляризационного и растрового методов получения стереоизображения возможна только при наличии специального аппаратного и программного обеспечения. В статье рассматривается возможность применения одного из самых распространенных на сегодня в индустрии развлечений решений на базе эклипсного способа сепарации ракурсов комплекта 3D Vision Kit компании NVIDIA для стерео визуализации научной информации космических проектов. Драйвер 3D Vision может быть использован как с видеокартами пользовательского сегмента, так и профессионального. В первом случае вывод стереоизображения приложением должен быть реализован на основе Direct3D, во втором варианте возможно использование механизма четверной буферизации (QuadBuffer) API OpenGL. Рассматриваются также способы визуализации стереоизображения, приведены примеры реализации вывода стереоизображения на устройство отображения для некоторых из способов сепарации ракурсов.

Ключевые слова: стерео визуализация; анаглифический способ сепарации ракурсов; эклипсный способ сепарации ракурсов; поляризационный способ сепарации ракурсов; растровый способ сепарации ракурсов; NVIDIA 3D Vision Kit; Sharp LL-151-3D.

Корнева Наталья Николаевна — ведущий программист, e-mail: nkorneva@romance.iki.rssi.ru.

Назаров Владимир Николаевич — заведующий лабораторией, e-mail: Vladimir.Nazarov@Cosmos.ru.

Введение

Классическая информационная модель [Nazirov et al., 2010] научного космического эксперимента включает несколько фаз преобразований измерений бортовой научной аппаратуры для получения конечного результата, обеспечивающего интерпретацию исследуемых физических феноменов. Следует отметить, что средства отображения полученных результатов измерений — одна из ключевых составляющих, обеспечивающих интерфейс между исследователем и автоматизированной системой информационного обеспечения проекта. Следовательно, использование современных технологических решений и средств, в данной области повысит эффективность научных космических исследований в целом и обеспечит базу для новых экспериментов.

ТЕХНОЛОГИИ СТЕРЕО ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Обычно для визуализации результатов научных космических экспериментов используются двумерные изображения изучаемых объектов и их характеристик, что обусловлено возможностями традиционных средств визуализации. Однако данный способ отображения не дает исследователю естественного для него пространственного представления объекта (явления), что затрудняет восприятие измеряемых параметров. Одним из способов повышения выразительности, а, следовательно, и информационной ценности результатов является стерео визуализация. В результате наших работ мы считаем наиболее эффективным использование следующих методов:

- анаглифического,
- эклипсного,
- поляризационного,
- растрового.

Суть этих методов в создании стереоскопического эффекта за счет раздельного наблюдения ракурсов представления исследуемого объекта.

Существующие методы

В анаглифическом способе сепарации ракурсов добиваются посредством цветового разделения изображения, видимого левым и правым глазом. Существенный недостаток метода — ограничение в подборе цветов объекта. В первую очередь при использовании красно-синих фильтров необходимо избегать спектрального красного или синего цветов. В противном случае будет наблюдаться эффект слепоты на одном глазу. Когда элемент оригинального изображения близок по цвету к одному из фильтров снижения зрительного дисбаланса, можно попытаться добиться посредством модификации алгоритма получения анаглифа или же путем использования других цветовых фильтров для очков. Однако подобные вариации распространены гораздо меньше, чем традиционные красно-синие фильтры.

На рис. 1 приведены результаты применения алгоритмов Color anaglyph (*a*) и Dubois (*b*) к стереопаре, полученной зондами-близнецами НАСА STEREO-A и STEREO-B (объект на стереопаре близок по цвету к красному). Как видно, стереоэффект в данном случае наиболее ярко выражен при преобразовании по алгоритму Dubois, хотя и со значительной потерей в цветопередаче.

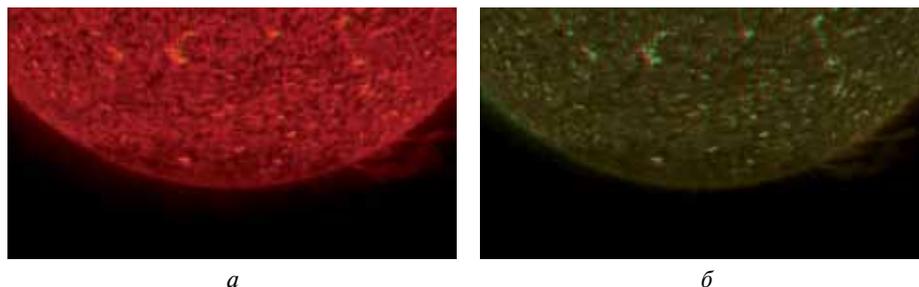


Рис. 1. Анаглифы, сформированные из стереопары, полученной зондами-близнецами НАСА STEREO-A и STEREO-B: *а* — алгоритм Color anaglyph; *б* — алгоритм Dubois

В растровых методах используется пространственное разделение стереопары. Изображение на экране состоит из узких вертикальных полосок, с чередованием изображений стереопары. Перед экраном размещается растр с таким же шагом, элементы которого позволяют каждому глазу видеть только «свои» полоски изображения.

Для поляризационного метода один из способов построения схемы стерео видеопроекции [Dubois, 2000] заключается в использовании варианта с двумя видеопроекторами, параллельно работающими на один недеполяризующий экран. На выходах обоих проекторов устанавливаются пассивные поляризационные фильтры, а зритель снабжается пассивными поляроидными стереочками. Алгоритм вывода стереоизображения в данном случае сводится к подаче на проекторы различных ракурсов стереоизображения.

Суть эклипсного метода — в последовательном выводе на экран изображения левого и правого кадров стереопары. Синхронно с выводом изображений переключаются специальные очки с жидкокристаллическими затворами, через которые наблюдатель смотрит на экран. Для реализации данного способа требуются отображающие устройства, способные работать при очень высоких частотах обновления (кадровой развертки).

Следует заметить, что любая задержка при выводе ракурса на экран может привести к разрушению стереозффекта. В этой ситуации актуальным становится использование механизма четверной буферизации (QuadBuffer), когда каждому ракурсу ставятся в соответствие два буфера. Сегодня среди наиболее популярных графических API такой механизм поддерживает только OpenGL. Однако использование QuadBuffer возможно только с видеокартами профессионального сегмента.

Другой способ формирования стерео вывода для данного способа сепарации — использование стерео драйверов. В этом случае драйвер осуществляет стерео вывод, управление стерео устройствами, но не позволяет формировать стерео вывод программисту.

Реализация эклипсного метода на базе решения Nvidia

Один из самых распространенных на сегодня в индустрии развлечений решений на базе эклипсного способа сепарации ракурсов — комплект 3D Vision Kit компании NVIDIA. Он может быть использован как с видеокартами пользовательского сегмента, так и профессионального. В первом случае вывод стереоизображения

приложением должен быть реализован на основе Direct3D с использованием драйвера 3D Vision, во втором варианте возможно использование механизма четверной буферизации (QuadBuffer) API OpenGL.

В случае, если приложение изначально формирует 3d вывод на базе Direct3D, стереоэффект создается автоматически стерео драйвером NVIDIA, перехватывающем на определенном этапе рендеринг 3D изображения в ядре Direct3D и формирующем дополнительное «разностное» изображение для второго глаза. Для уже существующего стерео контента (стереопар) автоматический стерео вывод не предусмотрен [Gateau, 2009].

Сравнительный анализ существующих методов стерео визуализации

Общим для всех рассмотренных методов считается обязательное наличие у конечного пользователя специальных аппаратных и программных средств. Одним из самых доступных считается анаглифический метод формирования стереоизображений. Однако его существенными недостатками представляются потеря в цветопередаче и повышенная утомляемость наблюдателя.

Преимущество растрового способа разделения ракурсов — отсутствие очков, но разрешение экрана в стерео режиме снижается вдвое по сравнению с 2d режимом. К тому же иллюзия объемности создается у наблюдателя только при определенном положении головы относительно монитора, а также при просмотре подобных изображений на экране слегка заметна «чересполосица» чётных и нечётных столбцов.

Эклипсный и поляризационный методы лишены этих недостатков, но недешевы в реализации.

С нашей точки зрения при выборе способа стерео визуализации следует опираться не только на тип устройства отображения, доступность необходимых аппаратных средств для конечного пользователя, но и на тип визуализируемых данных. В том случае, если изначально требуется осуществить стерео визуализацию трехмерных научных данных, представляется разумным выбрать эклипсный способ сепарации ракурсов на базе решения компании Nvidia для видеокарт пользовательского сегмента. В этом случае разработчику приложения не потребуется самостоятельно формировать дополнительное «разностное» изображение для второго глаза.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СРЕДСТВ СТЕРЕО ВИЗУАЛИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПРОЕКТАХ

Практическая реализация технологий стерео визуализации

Практическая реализация анаглифического и поляризационного способов сепарации была рассмотрена в предыдущем разделе. Остановимся более подробно на двух оставшихся методах — растровом и эклипсном.

В качестве устройства отображения для растрового метода нами был использован автостереоскопический дисплей Sharp LL-151-3D, использующий метод параллакс-барьера. При реализации алгоритма формирования стереоизображения следует обратить внимание на то, что в данной модели монитора затеняются не пиксели целиком, а их цветовые каналы.

Эклипсный способ сепарации ракурсов был реализован на базе технологии Nvidia для видеокарты пользовательского сегмента. Как уже отмечалось выше, для уже существующего стерео контента (стереопар) автоматический стерео вывод не предусмотрен. Для вывода стереопары в стерео режиме под управлением стерео драйвера Nvidia нами был использован компонент Direct3D API DirectX 9.0. Стерео вывод для видеокарт пользовательского сегмента следует осуществлять только в полноэкранном режиме, так как оконный вывод стерео драйвером Nvidia на данный момент не поддерживается.

С точки зрения разработчика стерео приложений для видеокарт пользовательского сегмента существенный недостаток комплекта 3D Vision Kit — отсутствие поддержки со стороны Nvidia возможности самостоятельного оповещения контроллера очков: какой из ракурсов выводится на монитор в текущий момент времени. Это влечет за собой необходимость обязательного использования стерео драйвера Nvidia.

Перспективы стерео визуализации в космических исследованиях

Проведенный анализ рассмотренных способов стерео визуализации и работы в плане их практического использования позволили применить данные методы для формирования стереоизображений из стереопар, полученных при испытаниях стереокамер проекта ФОБОС-ГРУНТ (рис. 2).

Однако область применения стерео визуализации в космических исследованиях не ограничивается только лишь отображением существующих стереопар, полученных со стереокамер космических аппаратов. Перспективной представляется попытка использования данной технологии в качестве инструмента исследователя при разработке теоретических проблем. На наш взгляд, основное преимущество подобного способа отображения перед традиционными двухмерными методами визуализации заключается в том, что для некоторых множеств данных при объемном изображении легче распознать отдельные последовательности значений.

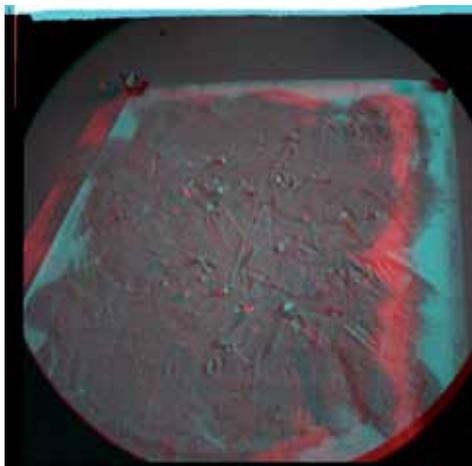


Рис. 2. Анаглиф (алгоритм Dubois), сформированный из стереопары, полученной при испытаниях стереокамер проекта ФОБОС-ГРУНТ

Кроме того, при использовании традиционных средств отображения основной проблемой становится большой объем отображаемых данных. Стерео визуализация в этом случае позволяет удалять на глубину менее значимые данные, а более значимые располагать в непосредственной близости от наблюдателя, что, в принципе, естественно для человека.

Заключение

Визуализация научной информации космических проектов — один из наиболее доступных методов решения фундаментальных и прикладных задач космических исследований. Повышение выразительности, а, следовательно, и информационной ценности изображения достигается за счет стерео визуализации.

В этой ситуации перспективной представляется попытка использования данной технологии в качестве инструмента исследователя при разработке теоретических проблем. Преимущества такого подхода по сравнению с традиционными способами отображения, прежде всего, в повышении информативности отображаемых данных, а также возможности проведения их «фильтрации» по степени важности и актуальности на данный момент.

Литература

- [Dubois, 2001] *Dubois E.* A projection method to generate anaglyph stereo images // IEEE Intern. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing. USA, Salt Lake City, UT, May 2001. V. 3. P. 1661–1664.
- [Dubois, 2000] *Dubois E.* Generation of anaglyph stereoscopic images. 2000. [Электронный текст]. Режим доступа: http://www.site.uottawa.ca/~edubois/anaglyph_000614.pdf.
- [Gateau, 2009] *Gateau S.* The In and Out: Making Games Play Right with Stereoscopic 3D Technologies // Game Developer Conference (GDC). USA, San Francisco, CA, March 2009.
- [Nazirov et al., 2010] *Nazirov R., Nazarov V., Korotkov F., Eismont N., Korneva N., Batanov O., Kazakevich Yu., Tsvelev A.* Best practice patterns in design of the information systems for Russian scientific space missions // SpaceOps 2010 Conf. Delivering on the Dream. USA, Huntsville, Alabama, 25–30 Apr. 2010.
- NASA Stereo Studying the Sun in 3D. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nasa.gov/mission_pages/stereo/multimedia/LeftRightImages.html.

SOME ASPECTS OF USAGE THE TECHNOLOGIES OF STEREO VISUALIZATION IN SPACE RESEARCHES

N. N. Korneva, V. N. Nazarov

Space Research Institute (IKI RAN), Moscow

Visualization of space missions scientific data is one of the most available methods in fundamental and applied space researches. The article is concerned with an opportunity of using the technology of stereo visualization for this purpose. This helps to make visual perception of the scene more natural for the researcher.

As a result of our work we suggest to use the following stereoscopic display methods:

- anaglyph,
- eclipse,

- polarization,
- lenticular.

The choose of the stereo visualization method depends on the stereo image quality requirements, availability to the end-user necessary hardware. For instance, only the anaglyphic separation method allows to create the stereo effect on a paper. In addition anaglyph algorithm selection depends on output device type. The great problem of anaglyphs is a restrictions on object colors.

Implementation of eclipse, polarization, lenticular methods of stereo imaging is possible only if the special hardware and software are available. The article is concerned with an opportunity of use one of the most common solutions in game industry Nvidia 3D Vision Kit (eclipse method) for space missions scientific data stereo visualization. Driver 3D Vision can be used as with the user segment graphics cards so with professional. In the first instance stereo imaging must be based on Direct 3D, with the professional graphics cards there is an opportunity of usage the technology of quad buffering API OpenGL.

The methods of stereo visualization, stereo imaging examples (for several types of displays) are presented in the article.

Keywords: stereo visualization; anaglyphic separation method; eclipse separation method; polarization separation method; lenticular separation method; NVIDIA 3D Vision Kit; Sharp LL-151-3D.

Korneva Natalia Nikolayevna — principal programmer, e-mail: nkorneva@romance.iki.rssi.ru.
Nazarov Vladimir Nikolayevich — chief of the laboratory, e-mail: Vladimir.Nazarov@Cosmos.ru.

Секция 3

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

КОРРЕКЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ШУМА В СТЗ СО СКАНИРУЮЩЕЙ ЛИНЕЙКОЙ ФОТОДАТЧИКОВ МЕТОДОМ ОТСЛЕЖИВАНИЯ СТРОК ПОДВИЖНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В. П. Андреев

*Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики
им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН),
Международная лаборатория «Сенсорика» (МЛ «Сенсорика»), Москва*

В работе предлагается модификация метода адаптивного выравнивания параметров фотоприёмной линейки, используемой в тепловизорах с оптико-механической системой сканирования. Выравнивание осуществляется посредством динамической коррекции видеосигнала по чувствительности и темновой составляющей, причем параметры коррекции вычисляются в процессе анализа исходной кадровой последовательности. В основу метода положено вычисление корректирующих коэффициентов через определение соотношения статистических параметров видеосигналов смежных фотоэлементов линейки. Ошибки в вычислении корректирующих коэффициентов минимизируются за счет отслеживания движения оптического изображения относительно поля сканирования. Найден высокоэффективный критерий, позволяющий выполнять отслеживание с точностью до долей межэлементного расстояния. Приведены результаты машинного моделирования метода отслеживания.

Работа частично поддержана РФФИ (проект № 10-07-00612а).

Ключевые слова: фотоприёмная линейка, сканирование, выравнивание параметров, геометрический шум, кадровая последовательность.

Введение

В системах технического зрения (СТЗ) ИК-диапазона для получения тепловых изображений с высоким разрешением используется оптико-механическое сканирование оптического изображения линейкой фотоприемников. В большинстве случаев это высокочувствительные охлаждаемые фотоприёмные устройства (ФПУ), изготовленные на основе КРТ (полупроводник Кадмий-Ртуть-Теллур). Применение таких ФПУ наталкивается на проблему «геометрического» шума, который является следствием разброса параметров fotocувствительных элементов [Seribner et al., 2000].

Хорошо известен эталонный способ борьбы с геометрическим шумом [Богомолов и др., 1987], который заключается в использовании устройств засветки линейки фотодатчиков источником эталонного излучения. Недостаток способа — низкая точность коррекции вследствие большой сложности организации равномерной засветки, а также в отсутствии учета флуктуационных шумов фотодатчиков и источников эталонного излучения.

В работе [Андреев, 2010] предложен безэталонный способ, основанный на статистической модели изображения, использующей сильные корреляционные связи между соседними строками сканируемого оптического изображения.

Андреев Виктор Павлович — заместитель директора по научным вопросам МЛ «Сенсорика», старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: andreev@nrptema.ru.

Известен способ, основанный на микросканировании, когда в систему оптико-механического сканирования встраивается дефлектор, смещающий оптическое изображение на величину межэлементного расстояния [Лебедев, Льюнг, 2007]. Однако в случае подвижного изображения этот способ даст значительную погрешность.

МЕТОД ОТСЛЕЖИВАНИЯ СТРОК ПОДВИЖНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для случая подвижного изображения предлагается на основе анализа видеосигнала сканирующей линейки фотодатчиков определить момент сдвига изображения точно на межэлементное расстояние и в результате вычислить корректирующие коэффициенты для каждого фоточувствительного элемента линейки.

Функция преобразования излучения в электрический сигнал фотодатчика может быть описана линейной моделью [Болтарь и др., 1999]:

$$U = S_u \Phi_T + V,$$

где S_u — эффективная вольт-ваттная чувствительность фотодатчика ($0 < S_u \leq 1$); V — эффективное темновое напряжение фотодатчика ($V \geq 0$); Φ_T — поток ИК-излучения при температуре сцены T ($\Phi_T \geq 0$).

Отсчеты выходного сигнала i -го и $(i-1)$ -го фотодатчиков при сканировании соответственно i -й и $(i-1)$ -й строки оптического изображения можно представить в виде (без учета аддитивной составляющей):

$$\begin{cases} U_{i,j} = S_i \times E_{i,j}, \\ U_{i-1,j} = S_{i-1} \times E_{i-1,j}, \end{cases}$$

для всех j отсчетов строки.

Определим функцию

$$\Delta L_{i,i-1}^{(j)} = \ln(U_{i,j}) - \ln(U_{i-1,j}).$$

В процессе перемещения оптического изображения перпендикулярно направлению сканирования $(i-1)$ -й фотодатчик постепенно будет приближаться к участку изображения с яркостью $E_{i,j}$, и в момент, когда $(i-1)$ -й фотодатчик займет место i -го фотодатчика, т. е. будет сканировать i -ю строку оптического изображения,

$$\Delta L_{i,i-1}^{(j)} = \ln(S_i) - \ln(S_{i-1}) = \Delta L = \text{const}$$

для всех j отсчетов строки.

Для фиксации этого момента необходимо сначала для i -го фотодатчика, сканирующего $[i]$ -ю строку оптического изображения, запомнить значения

$$L_{i,j}^{[i]} = \ln\left\{U_{i,j}^{[i]}\right\}$$

для всех j отсчетов $[i]$ -й строки.

Затем для $(i-1)$ -го фотодатчика с периодичностью сканирования выполнить вычисления по формуле:

$$\Delta L_{i,i-1}^{(j)} = L_{i,j}^{[i]} - \ln\left\{U_{i-1,j}^{[q]}\right\}$$

для всех j отсчетов $[q]$ -го сканирования.

В идеальном случае, когда $(i-1)$ -й фотодатчик займет место i -го фотодатчика, для каждой пары отсчетов m и n (из M отсчетов на строке)

$$J_{i,i-1}^{(m,n)} = \Delta L_{i,i-1}^{(m)} - \Delta L_{i,i-1}^{[n]} = 0$$

для всех m и n .

Тогда можно предложить интегральный критерий

$$\bar{J}_{i,i-1}(d) = \sum_{j=2}^M \left| \Delta L_{i,i-1}^{(j)}(d_q) - \Delta L_{i,i-1}^{[j-1]}(d_q) \right|,$$

где d_q — линейное расстояние между i -й строкой оптического изображения и центром чувствительной площадки $(i-1)$ -го фотодатчика при q -м сканировании.

Минимум функционала $\bar{J}_{i,i-1}(d)$ соответствует моменту, когда $(i-1)$ -й фотодатчик будет сканировать i -ю строку оптического изображения.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА

С целью определения эффективности критерия было проведено компьютерное моделирование процесса отслеживания строк подвижного изображения. В качестве исходных изображений было взято два цифровых изображения (аэрофотоснимок) большого формата и разного контраста, которые приведены на рис. 1.

Модель процесса сканирования фотоприёмной линейкой схематично приведена на рис. 2. Фотоприёмная линейка располагается вертикально и состоит из N элементов размером $a \times a$, при $a = 20$ пикселей исходного изображения. Расстояние между чувствительными элементами составляет $2h$, при $h = 25$ пикселей. При горизонтальном сканировании шаг взятия отсчётов составлял h пикселей. В результате одного сканирования исходного изображения формировалось цифровое изображение формата $N \times M$ элементов дискретного раstra ($M = 110$). За время одного кадра исходное изображение сдвигается по вертикали на величину $\Delta y = 1$ пиксел.



a



b

Рис. 1. Исходные изображения (аэрофотоснимок 2790×480 пикселей, 256 уровней яркости): *a* — контрастное; *b* — малоконтрастное

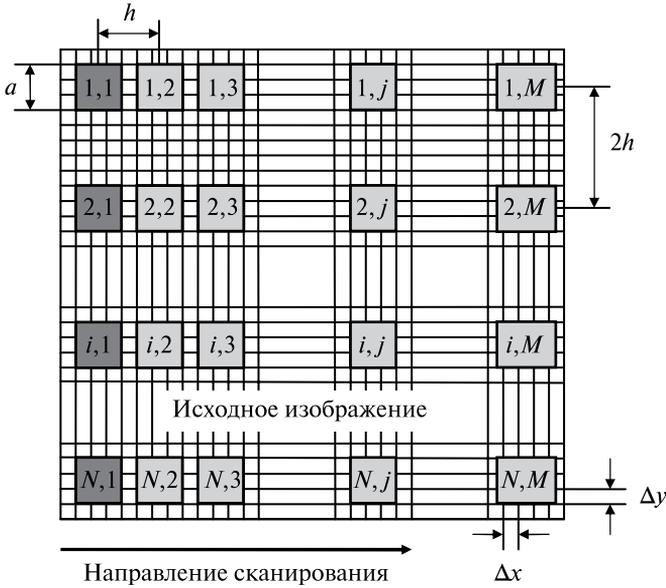


Рис. 2. Схематичное изображение процесса сканирования

На рис. 3 приведены результаты моделирования сканирования двух исходных изображений линейкой, состоящей из пяти элементов ($N = 5$), разброс параметров которых по чувствительности $\{S\}$ составляет 25 % при $V = 0$. Как в первом, так и во втором случае наблюдается чётко выраженный экстремум функции в тот момент, когда $(i - 1)$ -й фотодатчик оказывается на месте i -го фотодатчика ($d_q = 0$). Точность составляет менее $1/50$ межэлементного расстояния.

На рис. 4 приведены результаты моделирования сканирования двух исходных изображений линейкой ($N = 5$), разброс параметров по чувствительности $\{S\}$ которых составляет 25 %, а по темновой составляющей $\{V\}$ — 86 %. Видно, что введение существенного разброса по темновой составляющей не изменяет положение экстремума функции: в обоих случаях наблюдается чётко выраженный экстремум функции при $d_q = 0$.

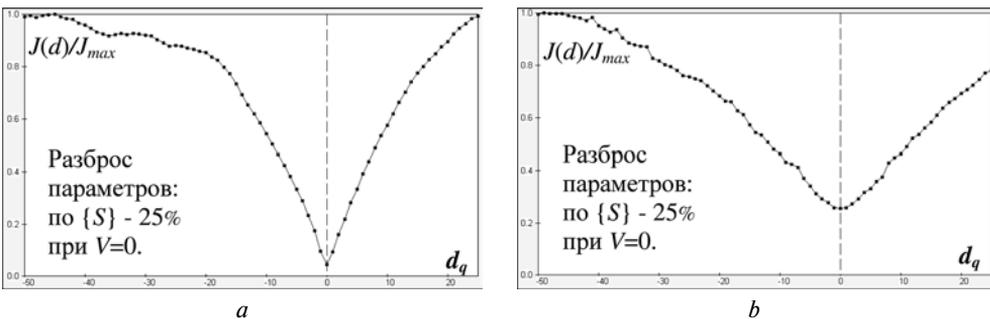


Рис. 3. Вид функции, определяющей поведение интегрального критерия для двух изображений (рис. 1а и б) при 25 % разбросе по S при $V = 0$

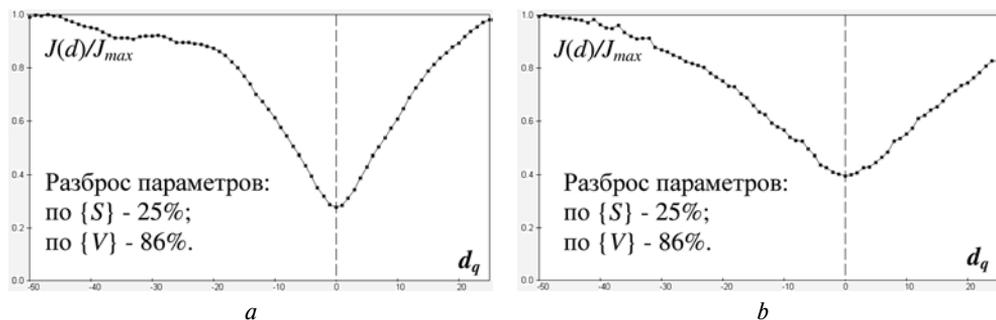


Рис. 4. Вид функции, определяющей поведение интегрального критерия для двух исходных изображений (a и b — рис. 1) при 25%-м разбросе по S и 86%-м разбросе по V

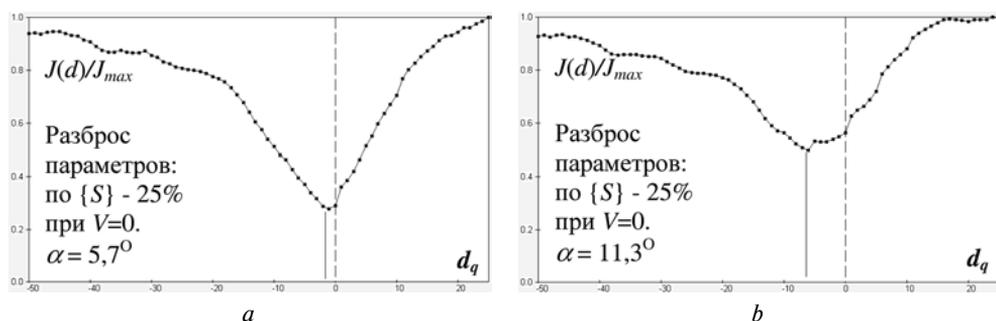


Рис. 5. Вид функции, определяющей поведение интегрального критерия при движении исходного изображения под углом: a — $5,7^\circ$; b — $11,3^\circ$ к нормали относительно направления сканирования

На рис. 5 приведены результаты моделирования сканирования контрастного исходного изображения (рис. 1а) линейкой ($N = 5$), разброс параметров которых по чувствительности $\{S\}$ составляет 25 % при $V = 0$, но движение исходного изображения происходит под углом соответственно $5,7$ и $11,3^\circ$ к нормали относительно направления сканирования.

Видно, что происходит некоторое смещение положения экстремума функции, т. е. несколько снижается точность: для варианта a — $d_q = -1$ пиксел, для варианта b — $d_q = -6$ пикселов.

Заключение

Компьютерное моделирование показало, что найденный критерий отслеживания:

- позволяет зафиксировать смещение изображения на величину межэлементного расстояния с точностью до долей этого расстояния;
- на положение минимума функционала не влияет добавление аддитивной составляющей видеосигнала;
- устойчив к разбросу параметров фотодатчиков линейки;
- устойчив к качеству исходного изображения;
- устойчив (в небольших пределах) к изменению направления смещения оптического изображения относительно направления сканирования (до $\pm 11^\circ$).

Литература

- [Андреев, 2010] Андреев В. П. Коррекция искажений видеосигнала для систем технического зрения, использующих сканирующую линейку фотодатчиков с большим разбросом параметров: Экстремальная робототехника // Тр. 21-й Международ. научно-тех. конф. СПб.: Политехника-сервис, 2010. С. 418–427.
- [Богомолов и др., 1987] Богомолов П. А., Сидоров В. И., Усольцев И. Ф. Приемные устройства ИК-систем. М.: Радио и связь. 1987. 208 с.
- [Болтарь и др., 1999] Болтарь К. О., Бовина Л. А., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И. и др. Тепловизор на основе «смотрящей» матрицы из $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ формата 128×128 // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 50–54.
- [Лебедев, Лыонг, 2007] Лебедев Д. Г., Лыонг К. Т. Моделирование адаптивного выравнивания параметров линейки фотоприемников с использованием микросканирования // Информац. процессы. 2007. Т. 7.2. С. 124–137.
- [Scribner et al., 2000] Scribner D. A., Schuler J. M. Warren P. et al. Image Preprocessing for the Infrared // SPIE Proc. 2000.V.4028. P. 222–223.

THE GEOMETRICAL NOISE CORRECTION FOR COMPUTER VISION SYSTEMS USING SCANNING PHOTOCELL ARRAY BY A METHOD FOR TRACING SCAN LINE OF MOVING IMAGES

V. P. Andreev

“Sensorika” International Laboratory (IL “Sensorika”), Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences (KIAM Russian Academy of Sciences), Moscow

Updating a method of adaptive alignment of the parameters of the photocell array used in the IR-computer vision systems with optic-mechanical scanning system is purposed. Alignment of the parameters is carried out by dynamic correction of video signal in sensitivity and in additive component. Correction parameters are calculated during the analysis of input frame sequence. The method is based on calculation of correcting factors through finding a parity of statistical parameters of video signals of adjacent cells of the photocell array. Errors in calculation of correcting factors are minimized at the expense of tracing movement of the optical image relative to a scanning field. A highly efficient criterion is found, allowing one to carry out tracing to within fractions of interelement distance. Results of computer simulation of the tracing method are presented.

Keywords: photocell array, scanning, parameters alignment, geometrical noise, frame sequence.

ЦИФРОВАЯ КОРРЕКЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ФОРМИРУЕМЫХ ПАНХРОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЪЕМОЧНОЙ АППАРАТУРОЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «МОНИТОР»

С. В. Блажевич¹, В. Н. Винтаев², Н. Н. Ушакова²,
М. Ю. Жиленев³

¹ *Национальный исследовательский университет Белгородский государственный университет (НИУ БелГУ)*

² *Белгородский университет кооперации, экономики и права*

³ *Департамент МКА и спутниковых систем ФГУП «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева», Москва*

В работе предлагается метод подавления паразитной периодической полосатости, наблюдаемой в контрасте текстуры космического изображения. При этом альтернативой методам фильтрации изображений, порождающим в подавляющем большинстве случаев остаточные воздействия на полезный сигнал, предлагается цифровая противофазная модуляция (антимодуляция), глубина и пространственная частота которой согласуются с сигналом.

Ключевые слова: цифровое изображение, модуляция, антимодуляция, гистограмма, пространственно-частотный спектр.

Введение

В панхроматической оптико-электронной съемочной аппаратуре (ПСА) космического аппарата (КА) «Монитор Э» формируется цифровое изображение, при масштабировании фрагментов которого для анализа тонких и сверхтонких структур контраста проявляется ориентированная периодическая полосатость контраста текстуры изображения с полосками шириной в 4...5 пикселей с глубиной модуляции контраста в 7...12 %. Исходя из предположений:

- о потере светочувствительными элементами матриц ПЗС первоначальных характеристик и, главное, потери однородности распределения характеристик по полю транспаранта ПЗС;
- возникновения паразитной положительной обратной связи в тракте преобразования, усиления и накопления полезного сигнала, приводящей к устойчивой и иницируемой входными потоками внешнего освещения ПЗС ПСА генерации ориентированной относительно изображения волны периодических возмущений;

Блажевич Сергей Владимирович — заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники факультета математики и информационных технологий, доктор физико-математических наук, e-mail: blazh@bsu.edu.ru.

Винтаев Виктор Николаевич — доцент кафедры информационных систем и технологий, факультет информационных систем и защиты информации, кандидат технических наук, e-mail: viktor.vn2010@yandex.ru.

Ушакова Наталья Николаевна — доцент кафедры информационных систем и технологий, факультет информационных систем и защиты информации, кандидат технических наук, e-mail: natush2006@yandex.ru.

Жиленев Михаил Юрьевич — руководитель группы, e-mail: mka@khrunichev.com.

- несоответствии реальной частоты считывания данных со строк ПЗС частоте, определяемой скоростью движения изображения на фокальной плоскости, предлагается, в качестве альтернативы линейным (в том числе и пространственно-частотным), рекурсивным и т. п. фильтрам, а также фильтрам, корректирующим изображение на основе статистического подхода, синхронная цифровая противофазная модуляция (антимодуляция) с согласованной глубиной и пространственной частотой.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В классическом варианте решения рассматриваемой задачи вектор коэффициентов антимодуляции размерностью на порядки меньшей размерности пиксельного пространства рассматриваемого изображения (в силу однородности возмущений вдоль модулирующих полос) определялся как оптимальный опорный план задачи линейного программирования на системе ограничений, построенной на переменных пикселах изображения с целевыми функциями минимаксного характера, формулируемыми на требованиях соблюдения метрологических характеристик изображения:

- минимума снижения радиусов пространственно-частотных спектральных портретов линеаментов изображения при предлагаемой обработке;
- минимума снижения среднего контраста изображения;
- минимума снижения разрешающей способности по Фуко, предоставляемого изображением.

В такой постановке решение задачи антимодуляции сводится в основном к нахождению набора пар — мультипликативного и аддитивного коэффициентов, корректирующих на первых итерациях в выделенных точках, а затем во всех точках изображения гипотетическую характеристику чувствительности матричного транспаранта принимаемого изображения, с достижением в итоге возможно более полной однородности синтезированной чувствительности по полю транспаранта [Винтаев и др., 1984]. Возникновение в таком подходе кроме мультипликативного еще и аддитивного коэффициента объясняется усилением сигналов, соответствующих уровням среднего или осредненного на небольших апертурах шума, в зонах полос при перемножении попиксельно на коэффициенты антимодуляции, компенсация которых может быть выполнена вычитанием аддитивного коэффициента. Один из недостатков этого метода — сложность и погрешность нахождения оптимального опорного плана.

На рис. 1 приведен фрагмент космического изображения с полосами, представленный в окне ViewFinder ERDAS. На рис. 2 показан увеличенный для более уверенного просмотра полос участок фрагмента в окне ViewFinder ERDAS, рис. 3 соответствует левому нижнему фрейму масштабирования участка фрагмента в окне вьювера.

Так как при выполнении антимодуляции не наблюдается характерных для всех видов фильтрации главных операций взвешенного некоторой маской суммирования пикселей исходного изображения в окрестности точки внесения коррекции, а производятся операции типа «пиксел в пиксел», то из обратных процедур восстановления искажений характеристик исходного изображения, вызванного попиксельным умножением на антимодулирующее изображение, остается только восстановление динамического диапазона изображения

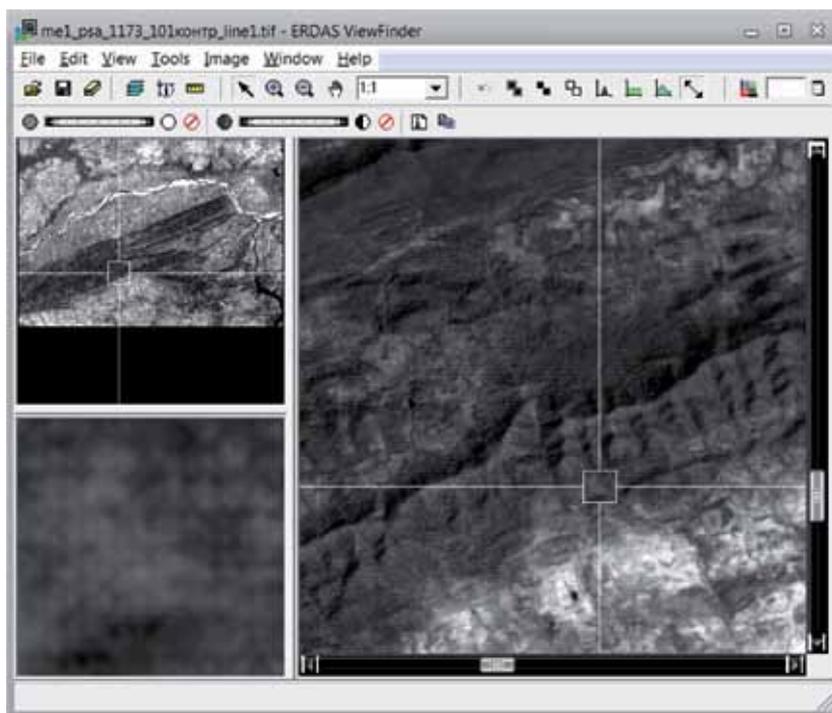


Рис. 1. Фрагмент космического изображения, представленный в окне ViewFinder ERDAS

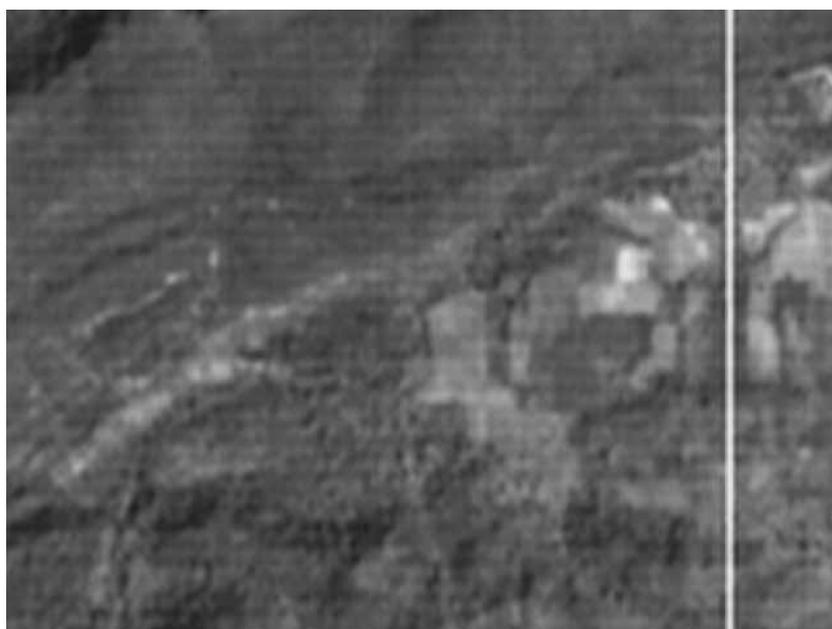


Рис. 2. Увеличенный для более уверенного просмотра полос участок фрагмента из окна ViewFinder ERDAS

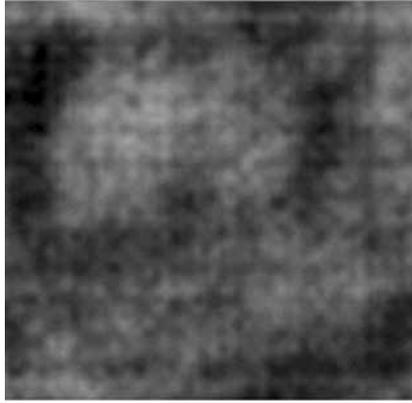


Рис. 3. Масштабированный в левом нижнем фрейме окна ViewFinder ERDAS участок изучаемого фрагмента

по разрядности и гистограмме. К примеру, перемножение кодов двух пикселей приводит к коду вдвое расширенному по разрядности и к квадратичному виду синтезированной чувствительности транспаранта, а для дальнейших этапов перемножений, если таковые имеют место, степень нелинейности чувствительности увеличивается. Однако при такого рода операциях радиусы пространственно-частотных спектральных портретов корректируемых изображений не снижаются, т. е. вероятность потерь полезных составляющих сигналов не увеличивается. Следует отметить, что фильтрация в области фурье-представлений дает аналогичные результаты и при работе с масками, так как сопряженный с фурье-фильтрацией оператор в исходном пространстве координат есть свертка изображения с некоторой маской.

АЛГОРИТМ АНТИМОДУЛЯЦИИ

На основе визуального анализа масштабированного в соответствующей степени изображения, выдвигается гипотеза о покрытии изображения изоморфно (с взаимно-однозначным соответствием пикселей) изображением полосатой функции (уточняемой методом наименьших квадратов), действующим мультипликативно на покрываемое изображение. Это покрывающее изображение в промежутках зон наложения модуляционного эффекта есть единица в каждом пикселе и меньше единицы в самих полосах (если вычислить средний контраст на исходном изображении, тогда в полосах коэффициенты могут быть и больше единицы и меньше).

Далее по этому изображению определяются параметры веерного интерференционного фильтра: размеры скользящих апертур; количество направлений фильтрации и рекурсивных запусков фильтра; порог по длине выявляемой регулярной составляющей. Наиболее критичный параметр — порог по длине регулярной составляющей, которая определяется как утроенное значение радиуса корреляции на исходном изображении.

На рис. 4 представлен фрейм после трехпроходного веерного фильтра, с базой фильтрации в 24 пиксела по восьми регулярно ориентированным относительно вертикали направлениям.

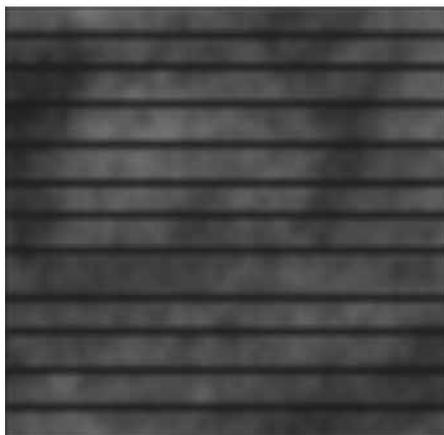


Рис. 4. Результат веерной фильтрации изображения

На рис. 5 приведен интерфейс программы веерной фильтрации. Следует заметить, что выбранный параметр фильтра в 24 пиксела превышает утроенное значение радиуса корреляции на изображении и совместно с тремя проходами фильтрации усугубляет сглаживающие свойства фильтра, что и необходимо для выявления полос модуляции в соответствии с выдвинутыми гипотезами.

Сконструированное таким образом модулирующее изображение далее инвертируется (рис. 6) и попиксельно перемножается с исходным изображением, формируя результат первого этапа (рис. 7). При этом формируется ряд результатов в зависимости от общего (меньшего единицы) коэффициента k при перемножении пар пикселей, с выбором результата с минимальной по амплитуде остаточной полосной модуляцией (или перемодуляцией).

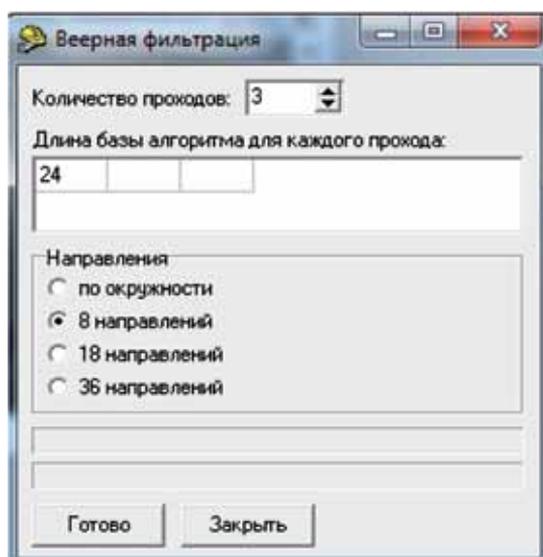


Рис. 5. Интерфейс программы веерной фильтрации

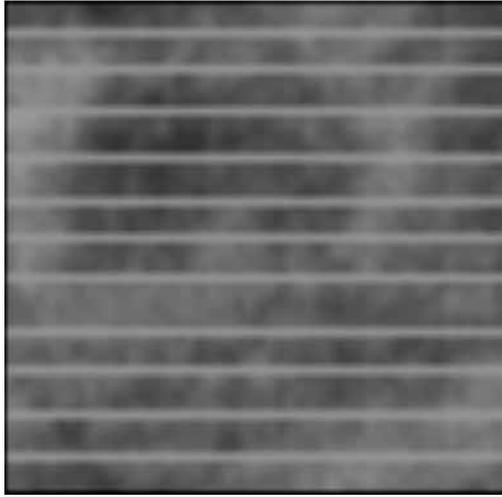


Рис. 6. Инвертированный результат веерной фильтрации

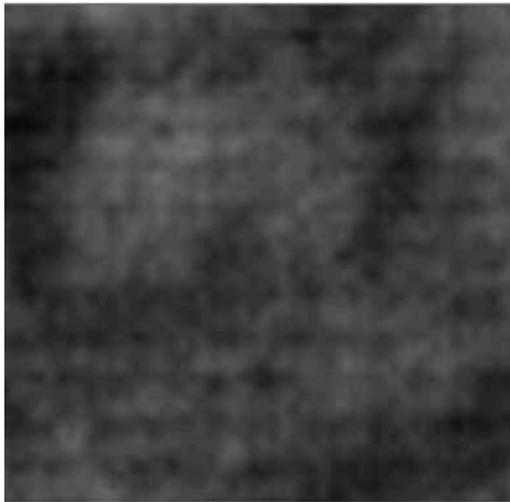


Рис. 7. Результат антимодуляции первого этапа с вариативным выбором минимума регулярной протяженной составляющей и подавлением нелинейности плотности распределения яркости

Этот выбор реализуется автоматически запуском веерного фильтра с заданными параметрами и установкой минимума амплитуды регулярной составляющей на всех результатах, полученных при переборе значений коэффициента k .

Квадратичная или полиномиальная второй степени результирующая функция распределения плотности яркости (гистограмма) выбранного посредством веерного фильтра результата подавляется обратным преобразованием — табличным локальным функциональным преобразованием степени $1/2$.

Указанные манипуляции повторяются как с исходным изображением с результатом первого этапа, так и с результатами последующих этапов.

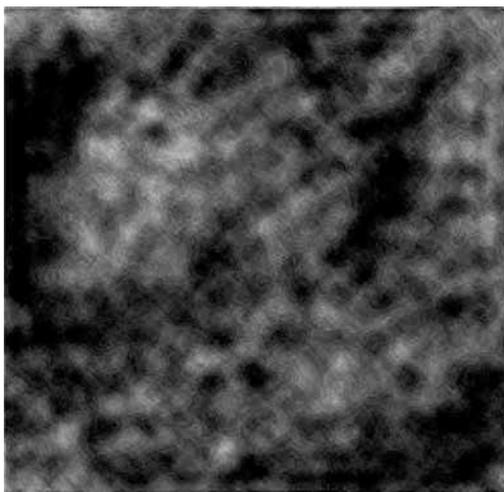


Рис. 8. Результат многоэтапной обработки без подавления нелинейности плотности яркости на последнем этапе

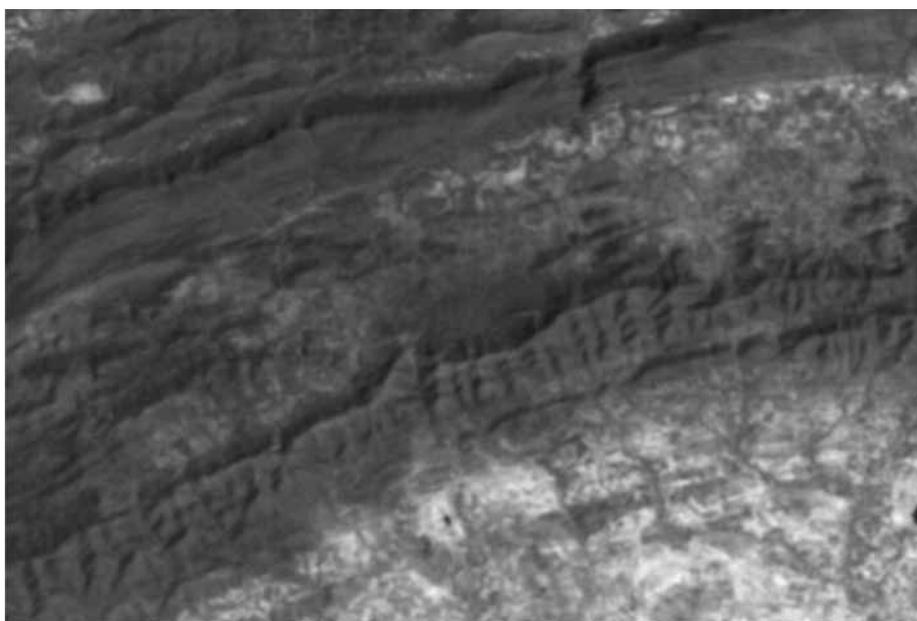


Рис. 9. Выходной результат коррекции исходного изображения

На рис. 8 приведен результат семиэтапной процедуры антимодуляции с отключенным подавлением нелинейности плотности распределения яркости на последнем этапе. Легко заметить достаточно высокую нелинейность (квадратичную) по амплитуде сигнала. Однако полосы модуляции удалены.

Выполнением последнего локального функционального преобразования изображение приводится к виду, представленному на рис. 9.

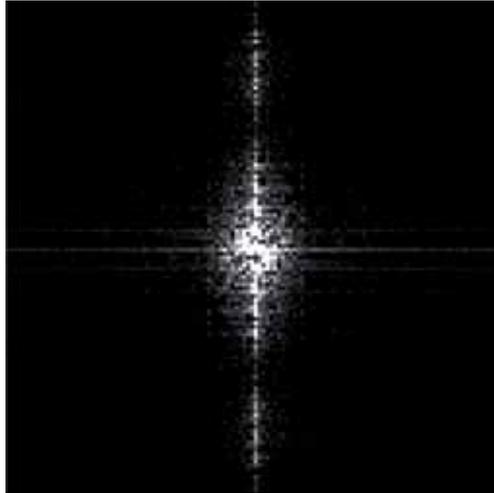


Рис. 10. Пространственно-частотный амплитудный спектр исходного изображения

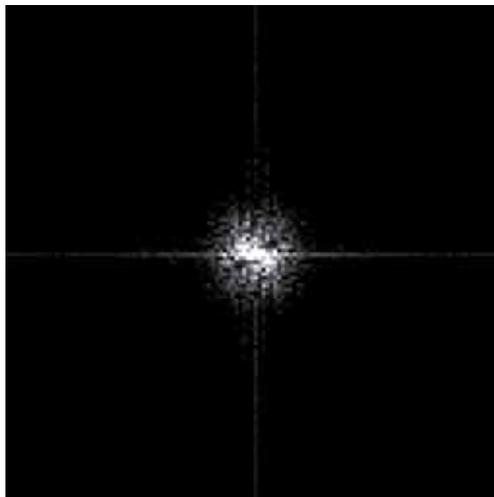


Рис. 11. Пространственно-частотный амплитудный спектр откорректированного изображения

На рис. 10 и 11 предьявлены амплитудные пространственно-частотные спектры Фурье исходного изображения и полученного результата. Легко заметить сохранение радиуса спектрального портрета при удалении модулирующей паразитной составляющей (спектр этой составляющей и есть прерывистая вертикаль на рис. 10).

Указанный подход, несмотря на сложность решения, ослабляет последствия, вызываемые перечисленными выше методами фильтрации и борьбы с описанным и подобными ему артефактами [Шовенгердт, 2010], самое существенное из которых — осязаемое искажение пространственно-частотного портрета образов изображений в области спектров тонкой структуры.

Литература

- [Винтаев и др., 1984] *Винтаев В. Н., Гамидов В. В., Исмаилов К. Х.* Задача цифровой нормализации матриц фотоприемных устройств // Сообщения НПО космических исследований. Баку: ЭЛМ, 1984. № 1. С. 38–51.
- [Шовенгердт, 2010] *Шовенгердт Р. А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Пер. с англ. А. В. Кирышина, А. И. Демьяникова. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

DIGITAL CORRECTION OF DISTURBANCES IN THE IMAGES FORMED BY PANCHROMATIC ELECTRO-OPTICAL IMAGING EQUIPMENT OF SPACECRAFT “MONITOR”

S. V. Blazhevich¹, V. N. Vintaev², N. N. Ushakova², M. Y. Zhilenev³

¹ *National Research University Belgorod State university (NRU BSU)*

² *Belgorod University of Cooperation, Economy and Law*

³ *Department Khruichev State Research and Production Space Center, Moscow*

The method of suppression of the spurious periodic banding observed in the space image texture contrast is proposed. For this purpose in alternative to the filtering methods, which causes in vast majority of cases the residual influence upon the desired signal, the digital opposite phase intensity modulation whose depth and spatial frequency are conformed to the signal is proposed.

Keywords: digital image, modulation, opposite phase modulation, histogram, spatial frequency spectrum.

Blazhevich Sergey Vladimirovich — head of a chair, doctor of science, e-mail: blazh@bsu.edu.ru.
Vintaev Viktor Nikolaevich — associate professor, PhD, e-mail: viktor.vn2010@yandex.ru.
Ushakova Natalya Nikolaevna — associate professor, PhD, e-mail: natush2006@yandex.ru.
Zhilenev Mikhail Yuriyevich — head of a group, PhD, e-mail: mka@khrunichev.com.

СТАТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ РЕЗКОСТИ ОПТИКО-ЦИФРОВЫХ РЕГИСТРАТОРОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

И. В. Басов¹, А. А. Краснобаев²

¹ Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики
им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН), Москва
² ЗАО «Штрих-М», Москва

Рассмотрены способы увеличения глубины резкости одноканальных статических оптико-цифровых регистраторов изображения: с применением кодированной апертуры, с кубической фазовой маской, с переносом резкости по цветовым каналам. Приведены результаты моделирования, произведено сравнение методов.

Ключевые слова: глубина резкости, кодированная апертура, кубическая фазовая маска, ФРТ, ФПМ, перенос резкости.

Введение

Нерезкое изображение, формируемое оптической системой (ОС), удобно описывать как свертку резкого изображения с функцией рассеяния точки (ФРТ) в плоскости наблюдения. При этом большей дефокусировке соответствует большее пятно рассеяния. Глубиной резкости ОС принято называть диапазон отклонений от плоскости фокусировки, при котором размеры пятна размытия не будут влиять на пространственное разрешение получаемого изображения.

В приведенных ниже трёх способах решение задачи увеличения глубины резкости достигается с помощью модификации ОС и цифровой обработки, использующей особенности применения этой модификации. В первом способе, в системе с кодированной апертурой на основе положения нулей в спектре размытого изображения определяется масштаб пятна размытия. Во втором способе, в системе с кубической фазовой маской, модификация ОС приводит к инвариантности функции рассеяния точки (ФРТ, PSF) относительно дефокусировки. В третьем — в системе с переносом резкости по цветовым каналам (резкость переносится из более резких в менее резкие каналы), намеренно увеличена продольная хроматическая аберрация и используется тот факт, что большинство реалистичных объектов имеют многоцветный характер излучения. Важная особенность представленных способов модификации ОС в том, что в них светосила ОС не изменяется вовсе или изменяется незначительно. Традиционный же способ увеличения глубины резкости — уменьшение диаметра диафрагмы приводит к значительному ухудшению энергетических характеристик ОС и необходимости увеличения времени экспозиции.

Басов Игорь Вячеславович — инженер-программист, аспирант, e-mail: monnom@rambler.ru.

Краснобаев Антон Александрович — начальник отдела, кандидат физико-математических наук, e-mail: aak@shtrih-m.ru.

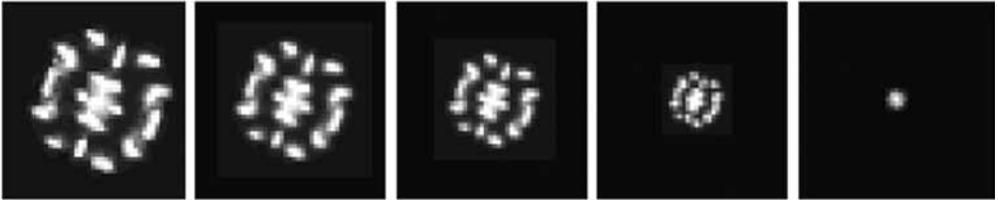


Рис. 1. ФРТ сформированные объективом с кодированной апертурой при различных величинах дефокусировки (точечные источники расположены на разных расстояниях)

СИСТЕМА С КОДИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

В этом способе [Levin et al., 2007a] в ОС устанавливается специальная диафрагма, которая «кодирует» в регистрируемом сенсором изображении информацию о расстоянии до изображаемого объекта. Диафрагма задает ФРТ, в фурье-спектре которой имеются нулевые значения, расположенные на определённых расстояниях от нулевой частоты.

Точечный источник изобразится на светочувствительном сенсоре в виде ФРТ, масштаб которой определяется расстоянием до источника (рис. 1). Обратное пропорционально масштабу ФРТ перемещаются нули спектра. Нули в спектре ФРТ попадают в спектр регистрируемого изображения, что позволяет судить о масштабе ФРТ:

$$U' = H_k U, \quad (1)$$

где U' — преобразование Фурье зафиксированного изображения; U — преобразование Фурье входного изображения; H_k — преобразование Фурье ядра фильтра (ФРТ) масштаба k .

При декодировании по нулям в спектре участков размытого изображения определяются масштабы ФРТ, с помощью которых впоследствии восстанавливается резкость изображения.

Восстановление нерезкого изображения, формируемого данной системой, в процессе моделирования проводилось с помощью частотной фильтрации, описанной в [Levin et al., 2007b]. Примененный фильтр, опирается на минимизацию сглаживающего функционала — градиента изображения. При этом предполагается, что плотность вероятности распределения градиентов в изображении является гауссовой.

СИСТЕМА С КУБИЧЕСКОЙ ФАЗОВОЙ МАСКОЙ

В основе способа [Dowski, Cathey, 1995] — идея проектирования ОС с ФРТ и функцией передачи модуляции (ФПМ, МТФ), не зависящими от величины дефокусировки в расширенном диапазоне фокусировок. Причем оптическая система должна передавать все пространственные частоты вплоть до предельного значения, соответствующего разрешающей способности светочувствительного сенсора. В результате поиска решения поставленной задачи выяснилось, что инвариантность ФПМ к величине дефокусировки может быть обеспечена с помощью специального оптического элемента (имеющего кубический профиль одной

из рабочих поверхностей) размещаемого в ОС — кубической фазовой маски, расположенной вблизи апертурной диафрагмы ОС.

Лучи в осесимметричных оптических системах пересекают оптическую ось в плоскости фокусировки практически в одной точке, образуя конус. Сечения пучка лучей плоскостями при различных дефокусировках представляют собой набор концентрических окружностей. В системе с кубической фазовой маской крайние лучи отклоняются специальным образом, формируя сечение пучка лучей, которое практически не зависит от дефокусировки в значительном диапазоне дефокусировок.

Восстановление резкого изображения осуществляется методами инверсной фильтрации одинаково для всех областей изображения не зависимо от расстояния до наблюдаемых объектов.

СИСТЕМА С ПЕРЕНОСОМ РЕЗКОСТИ ПО ЦВЕТОВЫМ

В работе [Guichard et al., 2009] предложен метод проектирования оптических систем, в котором намеренно увеличена продольная хроматическая аберрация ОС. Это приводит к тому, что лучи различного цвета фокусируются в различных плоскостях. Проводится оценка резкости изображения сформированного каждым из трёх цветных каналов и копирование высоких пространственных частот изображения наиболее резкого канала в два менее резких.

Для цифрового улучшения изображения необходимо выполнить следующие процедуры:

- получить карту резкости изображения (в источнике — «карту глубины сцены»). Для этого находят нормированную относительную резкость между каналами изображения

$$M_{i=R,G,B}(x, y) = \frac{|\nabla I_i(x, y) - \overline{\nabla I_{RGB}}(x, y)|}{\overline{\nabla I_{RGB}}(x, y)}, \quad (2)$$

где (x, y) — точка изображения, для которой оценивается относительная резкость, $\nabla I_i(x, y)$ — величина градиента для каждого отдельно взятого цветового канала ($i = R, G, B$), $\overline{\nabla I_{RGB}}(x, y)$ — средняя для трех каналов величина градиента;

- перенести резкие зоны между каналами в соответствии с полученной картой. К нерезкому изображению добавляются части высокочастотных составляющих из других каналов. Этот процесс можно описать выражением:

$$C_{i=R,G,B}^{out} = C_{i=R,G,B}^{in} + a_{i=R} HP_{i=R}(C_R) + a_{i=G} HP_{i=G}(C_G) + a_{i=B} HP_{i=B}(C_B), \quad (3)$$

где C_i^{out} — яркость выходного изображения одного из каналов; $HP_i(C_i)$ — высокочастотные фильтры (High Pass), примененные к изображению j -го канала; a_i — весовые коэффициенты.

Отметим, что высокочастотные фильтры зависят от передаточной функции ОС, положения на плоскости сенсора, резкости изображения и других менее значимых характеристик системы и объекта. Также весовые коэффициенты зависят от цвета области рассмотрения объекта (т. е. от доминирующего цвета в данной области).

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ

В процессе исследования были смоделированы системы с кодированной апертурой и кубической фазовой маской. Моделирование системы с переносом резкости по цветовым каналам необходимо проводить для конкретного объектива со строго определенными характеристиками, предварительно спроектировав объектив с увеличенной продольной хроматической aberrацией. Поэтому в подробном сравнении данный способ не участвует. При построении модели учитывались: процесс формирования размытого изображения оптической системой, его дискретизация, квантование, влияние шумов и процесс восстановления резкого изображения. Для формирования размытого изображения при различных дефокусировках сначала вычислялась ФРТ как автокорреляция функции выходного зрачка оптической системы, а затем находилась свертка ФРТ с резким входным изображением. Тестовое входное изображение — линейная штриховая мира — представлено на рис. 2.

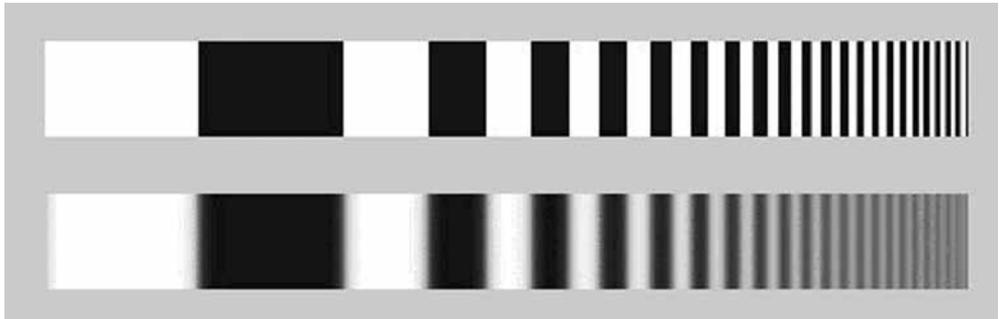


Рис. 2. Пример линейной штриховой миры и ее размытое изображение

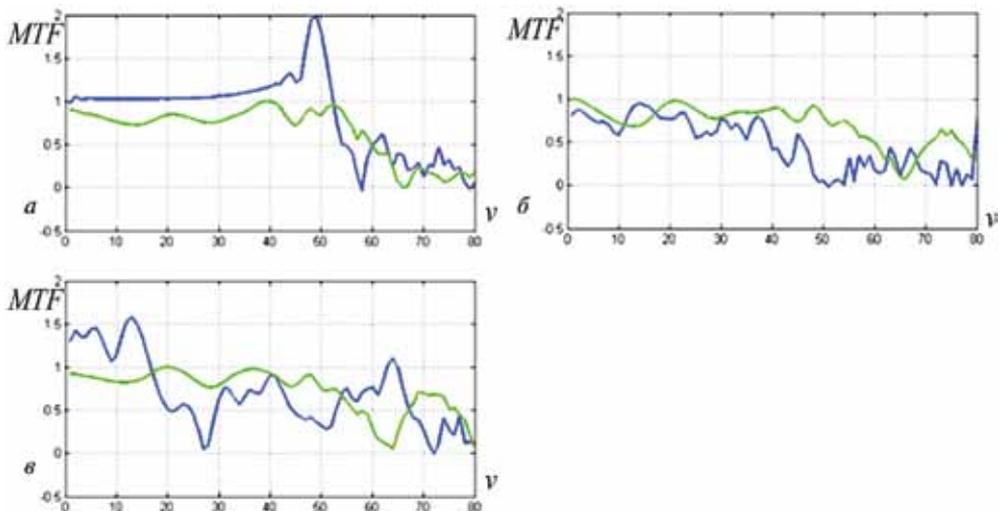


Рис. 3. Функции передачи модуляции: синим — системы с кодированной апертурой, зеленым — системы с кубической фазовой маской. $MTF = f(d)$; v — пространственная частота пар, лин./мм; d — дефокусировка. Дефокусировка: a — 0,55 мм; b — 1,1 мм; c — 2,2 мм

Расчет ФРТ производился для длины волны оптического излучения 0,55 мкм — моделировался случай монохроматического излучения. По результатам моделирования полного тракта с учетом применения цифровой фильтрации изображения сравнивались:

- распределение передаваемых системой частот $MTF = f(d)$ (рис. 3);
- «вырезаемые» частоты $\nu = f(d)$ в зависимости от дефокусировки для уровня $MTF = 0,2$ (рис. 4);
- выходное отношение сигнал/шум (рис. 5).

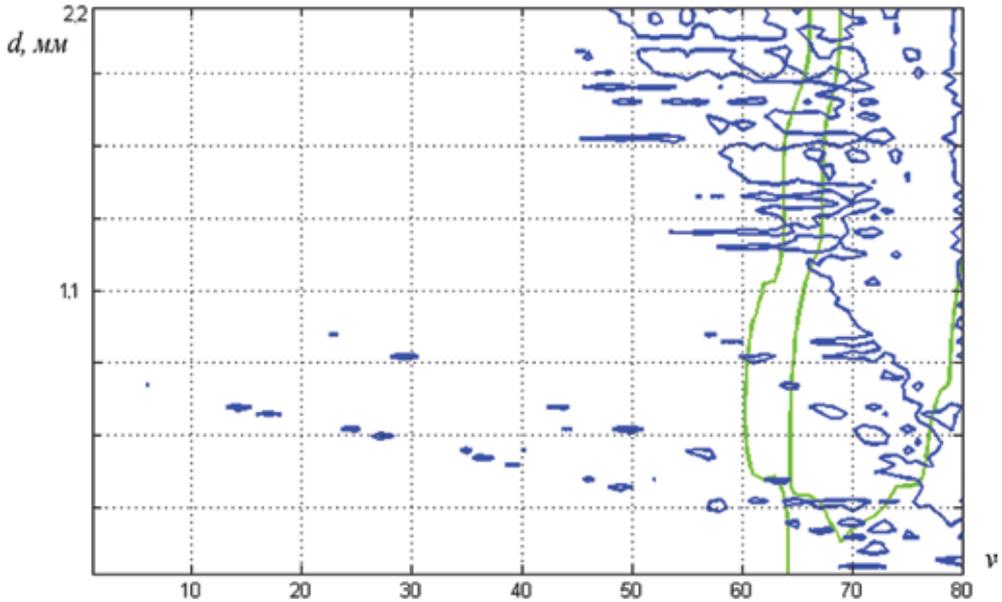


Рис. 4. Области «вырезаемых» частот для $MTF = 0,2$: синим — для системы с кодированной апертурой; зеленым — для системы с кубической фазовой маской

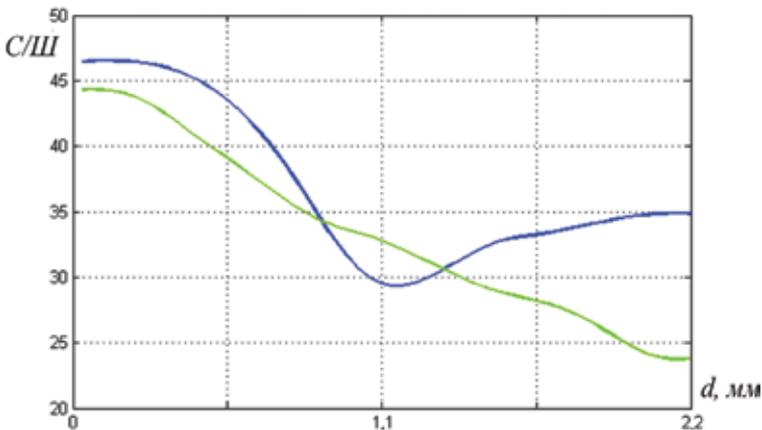


Рис. 5. Выходное соотношение сигнал/шум: синим — системы с кодированной апертурой; зеленым — системы с кубической фазовой маской

По графикам распределения передаваемых ОС частот (см. рис. 3) видно, что система с кубической фазовой маской не имеет нулей в значительном диапазоне частот в широком диапазоне дефокусировок. Области «вырезаемых» частот системы с кодирующей апертурой соответствуют нулям спектра ФРТ и носят локальный характер. Применение более сложных фильтров, например, фильтра Ричардсона-Люси незначительно улучшает картину.

Приведенные локальные «вырезаемые» (см. рис. 4) частоты не будут носить критического значения во многих системах визуального контроля оператором. Однако для автоматических систем технического зрения требуется более глубокая разработка проблемы фильтрации в системе с кодирующей апертурой. Ситуация с вырезаемыми частотами может быть также улучшена посредством выбора иной формы кодированной апертуры (в процессе моделирования применялась апертура, предложенная в работе [Levin et al., 2007a], которая обеспечивает хорошую дифференциацию с помощью положения нулей спектра при определении величины дефокусировки).

Серьезным недостатком системы с кубической фазовой маской можно назвать невысокое выходное соотношение сигнал/шум (см. рис. 5), связанное со значительным ростом площади пятна рассеяния при увеличении дефокусировки. Для расширения рабочего диапазона дефокусировок необходимо применять регистраторы с хорошими шумовыми характеристиками и расширенным динамическим диапазоном. Способ с применением кодированной апертуры предъявляет менее жесткие требования к регистратору в силу меньшей скорости роста площади пятна размытия при увеличении дефокусировки.

Результаты работы приведены в таблице и представляют основные особенности и характеристики для трех рассмотренных способов, позволяющие выбрать оптимальный для имеющейся задачи.

Сравнительная таблица способов увеличения глубины резкости

Способ (характеристика)	Алгоритм восстановления	Особенности применения в реальных системах	МАХ расширение глубины резкости
Перенос резкости по цветовым каналам	Основан на априорных данных об оптическом тракте	Эффективен только для многоцветных объектов	Зависит от объектива и спектра объекта
Кубическая маска	Инверсный фильтр	Сложность изготовления маски	Приблизительно в 4 раза, ограничена характеристиками регистратора
Кодированная апертура	Многоитерационные нелинейные / основанные на статистических особенностях изображения сцены	ФРТ объектива, как правило, изменяется по полю регистратора изображения	Приблизительно в 10 раз, ограничена вычислителем и характеристиками регистратора

Литература

- [Dowski, Cathey, 1995] *Dowski R., Cathey Jr. and W. T.* Extended Depth of Field Through Wavefront Coding // *Applied Optics*. 1995. V. 34. P. 1859–1866.
- [Guichard et al., 2009] *Guichard F., Hoang Phi Nguyen, Tessières R., Pyanet M., Tarchouna I., Cao F.* Extended depth-of-field using sharpness transport across color channels // *Intern. Soc.*

for Optics and Photonics (SPIE). 2009. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.spiedigitallibrary.org>.

[Levin et al., 2007a] *Levin A., Fergus R., Durand F., Freeman W. T.* Image and Depth from a Conventional Camera with a Coded Aperture // J. Association for Computing Machinery's (ASM) Trans. on Graphics (TOG): Proc. ACM SIGGRAPH 2007. V. 26. Iss. 3. July 2007.

[Levin et al., 2007b] *Levin A., Fergus R., Durand F., Freeman W. T.* 2 Deconvolution Using Natural Image Priors // MIT, SIGGRAPH. 2007. [Электронный текст]. Режим доступа: <http://groups.csail.mit.edu/graphics/CodedAperture/SparseDeconv-LevinEtAl07.pdf>.

DEPTH OF FIELD EXTENDING METHODS FOR SINGLE CHANNEL STATIC OPTICAL-DIGITAL IMAGE DETECTORS

*I. V. Basov*¹, *A. A. Krasnobaev*²

¹ *Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences, Moscow*

² *Ltd "Shtrih-M", Moscow*

Depth of field (DOF) extending methods for single channel static optical-digital image detectors are considered. Those are: with coded aperture, with cubic phase mask, using sharpness transport across color channels. Modelling results are listed. Comparison made.

Keywords: depth of field, coded aperture, cubic phase mask, PSF, MTF, sharpness transport.

Basov Igor Vyacheslavovich — engineer, programmer, postgraduate, e-mail: monnom@rambler.ru.
Krasnobaev Anton Alexandrovich — head of department, PhD, e-mail: aak@shtrih-m.ru.

МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВЫРАВНИВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ И КОРРЕКЦИИ КОНТРАСТНОСТИ

М. Н. Фаворская, А. Г. Зотин, А. И. Пахирка

*Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева (СибГАУ), Красноярск*

Разработан новый метод улучшения цветных изображений, содержащий темные и засвеченные участки. Метод основан на адаптивном выравнивании спектральных диапазонов с последующей коррекцией контрастности изображения. Представлены экспериментальные результаты улучшения изображений и видеоматериалов.

Ключевые слова: улучшение изображения, логарифмическое выравнивание, коррекция контрастности.

УЛУЧШЕННЫЙ МЕТОД ВЫРАВНИВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ

Методы улучшения изображений, основанные на сложной фильтрации, используются для решения многих задач, в частности, для компенсации искажений некалиброванных оптических устройств (γ -коррекция), для улучшения цветового восприятия, а также для локального и глобального спектрального выравнивания изображения (устранение теней и бликов).

Метод многомерного выравнивания спектральных диапазонов (так называемый *Multi-Scale Retinex — MSR*) применяется для обработки изображений с широким динамическим диапазоном яркости сцены, когда на изображении присутствуют яркие блики и глубокие тени. Классическая многомерная MSR-функция является взвешенной суммой одномерных SSR-функций (*Single-Scale Retinex*), найденных при разных масштабах. Многомерная выходная функция i -го цветового канала $R_{M_i}(x, y, \mathbf{w}, \boldsymbol{\sigma})$ определяется как

$$R_{M_i}(x, y, \mathbf{w}, \boldsymbol{\sigma}) = \sum_{n=1}^N w_n R_i(x, y, \sigma_n), \quad (1)$$

где $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_m)$; $m \in [1, M]$; $\sum_{n=1}^N w_n = 1$ — весовой вектор; $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$, $n \in [1, N]$ — вектор масштабов одномерных выходных функций i -го цветового канала $R_i(x, y, \sigma)$, вычисляемых следующим образом:

$$R_i(x, y, \sigma) = \log\{I_i(x, y)\} - \log\{F(x, y, \sigma) * I(x, y)\}, \quad (2)$$

где $I_i(x, y)$ — входная функция i -го цветового канала по координатам x и y ; σ — масштабный коэффициент; знак $*$ обозначает свертку функций; $F(x, y, \sigma)$ — гауссиан, определяемый как

Фаворская Маргарита Николаевна — доцент, кандидат технических наук, e-mail: favorskaya@sibsau.ru.

Зотин Александр Геннадьевич — доцент, кандидат технических наук, e-mail: zotin@sibsau.ru.

Пахирка Андрей Иванович — аспирант, e-mail: pakhirka_a@sibsau.ru.

$$F(x, y, \sigma) = K \exp\left\{\frac{-(x^2 + y^2)}{\sigma^2}\right\}. \quad (3)$$

При этом коэффициент K выбирается таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\iint_{\Omega_{x,y}} F(x, y, \sigma) dx dy = 1, \quad (4)$$

где $\Omega_{x,y}$ — множество пикселей, принадлежащих всему изображению.

Классический *MSR*-метод приводит к искажению цвета изображения, так как значение каждой цветовой составляющей пиксела (например, в *RGB*-пространстве) заменяется отношением ее исходного значения к среднему значению данной цветовой составляющей окружающих пикселей. Существуют несколько решений данной проблемы — переход в другие цветовые пространства с явным разделением яркостной и оттеночной составляющих (*HIS*-, *HSV*-, *HSL*-пространства), применение модели нормализованного разделения яркостной и оттеночной составляющих. Дополнительная обработка выполняется в соответствии с выражением:

$$R'_{M_i}(x, y, \mathbf{w}, \sigma, b) = R_{M_i}(x, y, \mathbf{w}, \sigma) * I'_i(x, y, b), \quad (5)$$

где $I'_i(x, y, b)$ — нормализованная яркость, определяема как

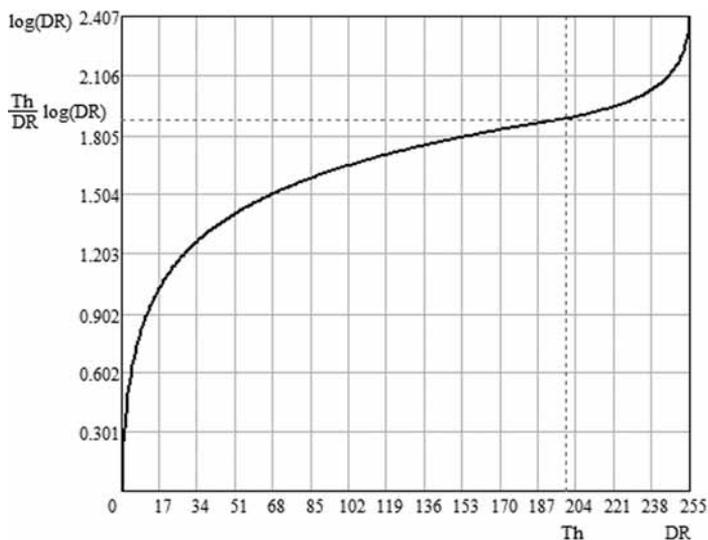
$$I'_i(x, y, b) = \log\left[1 + c \left(\frac{I_i(x, y)}{\sum_{i=1}^3 I_i(x, y)}\right)\right], \quad (6)$$

где c — коэффициент, выбираемый из середины диапазона значений $[0...255]$, $c = 100...125$.

В связи с тем, что детали изображения более различимы в теневых областях, чем в засвеченных, введем понятие адаптивного выравнивания диапазонов. Построена сложная функция, зависящая от двух пороговых значений $T_2 > T_1$, находящихся в диапазоне $[1, D]$ i -го цветового канала, где D — верхнее значение диапазона, $D_{\max} = 255$. В области теней (интервале $[1, T_1]$) функция подчиняется логарифмической зависимости, в интервале $[T_1, T_2]$ функция прямо пропорциональна, а в области засветки (интервал $[T_2, D]$) берется логарифмическая зависимость инверсной функции изображения [Фаворская, Пахирка, 2010].

Из-за характеристик логарифмической функции *MSR*-алгоритм делает детали изображения более различимыми в теневых областях, чем в засвеченных. Чтобы сделать детали различимыми в засвеченных областях можно применить логарифмическую функцию к инвертированному изображению. Построим модифицированную функцию $L(I(x, y))$, состоящую из прямой и обратной ветви логарифма и зависящую от порогового значения Th , выбираемого пользователем

$$L(I(x, y)) = \begin{cases} k_l \log(I(x, y)), & I(x, y) < Th, \\ -k_l \log(DR - I(x, y)) + \log(DR), & I(x, y) \geq Th, \end{cases} \quad (7)$$



Вид функции $L(I(x, y))$ с $Th = 200$

где

$$k_1 = \frac{Th}{DR} \log(DR) ; k_2 = \frac{\left(1 - \frac{Th}{DR}\right) \log(DR)}{\log(DR - Th)},$$

где DR — динамический диапазон изображения, в данном случае $DR = 255$ (для изображений с восемью битами на цветовой канал); k_1 и k_2 — весовые коэффициенты. Пороговое значение Th выбрано равное 230. Вид функции $L(I(x, y))$ приведен на рисунке.

Объединение ветвей дает классическому алгоритму MSR возможность повышать контрастность деталей в областях повышенной яркости. Использование такого вида логарифмической функции в определенной мере повышает контрастность деталей информативной области типичных распределений яркости (60...200), но значительно в меньшей мере, чем в затененных участках и участках с высокой яркостью.

РАЗРАБОТКА ФИЛЬТРА ENHANCED UNSHARP

Существующие методы повышают как резкость деталей изображения, так и шум. Для коррекции контрастности применим модифицированный метод нерезкого маскирования введением коэффициентов k_{light} , k_{dark} регулирования степени осветления и затемнения отдельных участков изображений при генерации карты коррекции. Коррекция резкости на границах объектов происходит в тех областях, где контурное представление превышает заданное пороговое значение TS_c . Введем функцию $F_{lk}(x, y)$, выравнивающую величину коррекции для того, чтобы не вносить сильные изменения при большом яркостном перепаде, рассчитываемую по формуле

$$F_{lk}(x, y) = \frac{|F_{delta}(x, y)|}{\log_{10}(|F_{delta}(x, y)|)} \left(1 - \frac{I_{mm}(x, y)}{255} \right), \quad (8)$$

где $I_{mm}(x, y)$ — функция разности между максимальным и минимальным значением по окрестности обрабатываемой точки, $F_{delta}(x, y)$ — функция, учитывающая отклонения между оригинальным изображением и сглаженным.

Карта коррекции генерируется с учетом порогового значения TS_d , позволяющего отсекалть минимальные значения отклонений между оригинальным изображением и его сглаженным представлением в соответствии с формулой:

$$I_{shmap}(x, y) = \begin{cases} I(x, y) + F_{delta}(x, y)F_{lk}(x, y)k_{dark} & \text{при } F_{delta}(x, y) \leq -TS_d, \\ I(x, y) + F_{delta}(x, y)F_{lk}(x, y)k_{light} & \text{при } F_{delta}(x, y) \geq TS_d. \end{cases} \quad (9)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанный программный продукт «Нелинейное адаптивное улучшение изображения» предназначен для нелинейного улучшения изображений, содержащих затененные и засвеченные участки. Осуществляется адаптивное логарифмическое выравнивание распределения яркости изображений с повышением контраста деталей как в теневых областях, так и в областях с повышенной освещенностью. Программа имеет ряд дополнительных функций, в частности, содержит модуль оценки качества полученных изображений по двум критериям — отношение пикового сигнала к шуму и отношение контраста к шуму.

В ходе экспериментальных исследований использовались изображения с нормальной освещенностью, затененные изображения и изображения, содержащие области засветки. В качестве экспериментальных данных использовались изображения с разрешением 640×480 пикселей, получаемые с веб-камеры. Было исследовано влияние на изображения трех известных фильтров: высокочастотного *High Pass*; на основе Лапласиана; нерезкого маскирования *Unsharp*. Дополнительно исследовалось влияние разработанного фильтра *Enhanced Unsharp*, построенного на основе выражений (8, 9). Было выяснено, что высокочастотный фильтр и фильтр на основе Лапласиана увеличивают шумовую составляющую и повышают контрастность по всему изображению. Фильтр нерезкого маскирования сглаживает изображение, а разработанный фильтр *Enhanced Unsharp* помимо сглаживания на однородных участках фона, включая затененные, обеспечивает повышение контрастности контуров. Таким образом, соотношение изменения контрастности контур/фон для разработанного фильтра достигает 30%, в то время как для других фильтров эта величина изменяется только от -5 до 4 %. В результате такого избирательного воздействия нового фильтра фоновые участки изображения выглядят сглаженными, и контуры становятся более четкими. Особенно этот эффект заметен на теневых и засвеченных участках исходного изображения.

Литература

[Фаворская, Пахирка, 2010] Фаворская М. Н., Пахирка А. И. Модель улучшения цветных изображений на основе адаптивного выравнивания спектральных диапазонов // Системы управления и информац. технологии. М.: Воронеж, 2010. № 1 (39). С. 23–26.

**SPATIO-TEMPORAL CORRECTION OF VIDEO SEQUENCES
IN STEREOVISION**

M. N. Favorskaya, A. G. Zotin, A. I. Pakhirka

*Siberian State Aerospace University after academician M. F. Reshetnev
(SibSAU), Krasnoyarsk*

The novel method of enhancement of color images containing shadows and light-struck areas was developed. The method is based on an adaptive equalization of spectral ranges with a following contrast correction of image. The experimental results of images and videos enhancement are presented.

Keywords: image enhancement, logarithmic equalization, contrast correction.

Favorskaya Margarita Nikolaevna — associate professor, PhD, docent, e-mail: favorskaya@sibsau.ru.

Zotin Aleksandr Gennadyevich — associate professor, PhD, e-mail: zotin@sibsau.ru.

Pakhirka Andrey Ivanovich — PhD-student, e-mail: pakhirka_a@sibsau.ru.

МНОГОМАСШТАБНАЯ РАНГОВАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ: УЛУЧШЕНИЕ СЛАБОКОНТРАСТНЫХ ЗАШУМЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

М. В. Сторожилова, Д. В. Юрин

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ),
Факультет вычислительной математики и кибернетики (ВМиК), Москва*

В работе предлагается многомасштабное обобщение алгоритма статистической дифференциации для улучшения слабоконтрастных изображений. Рассматриваются вопросы одновременного выделения деталей различных размеров и подавления шумов. Для вычисления средних значений в статистической дифференциации рассматриваются свёртки с функцией Гаусса и быстрые ранговые алгоритмы, основанные на многомасштабном представлении гистограмм.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. и РФФИ (проект № 09-07-92000-ННС_a).

Ключевые слова: статистическая дифференциация, многомасштабный подход, пирамида детальности, ранговые алгоритмы, алгоритм KNV, многомасштабные гистограммы.

Введение

При наблюдении в плохих условиях освещения цифровые изображения получают слабоконтрастными и сильно зашумленными. Актуальной задачей становится улучшение качества изображений путем повышения контраста, подчеркивания деталей и подавления шумов. Однако эти цели часто вступают в противоречие друг с другом: повышение контраста и подчеркивание деталей одновременно усиливает шумы, а фильтрация наряду с шумами подавляет и полезную информацию. Более того, при сглаживании возникают ложные границы, сопоставимые по яркости с границами слабоконтрастных объектов.

В качестве решения проблемы предлагается многомасштабное обобщение алгоритма статистического дифференцирования [Pratt, 2007]. При этом для подавления шумов можно использовать как свертки с Гауссовым ядром, так и нелинейные ранговые алгоритмы [Ярославский, 1987], не размывающие границы.

КЛАССИЧЕСКАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ

Обычные алгоритмы повышения чёткости изображения по локальной окрестности вместе с полезными деталями поднимают шум и усиливают детали только размера порядка радиуса окрестности и меньше. Некоторые задачи также требуют,

Сторожилова Мария Вадимовна — студентка факультета ВМиК, e-mail: mariastorozhilova@gmail.com.

Юрин Дмитрий Владимирович — старший научный сотрудник лаборатории математических методов обработки изображений, кандидат физико-математических наук, e-mail: yurin_d@inbox.ru, yurin@cs.msu.su.

чтобы на изображении более чётко выделялись детали какого-то априори известного размера. Многомасштабная статистическая дифференциация позволяет избирательно подчеркнуть детали $K - 1$ разных характерных размеров, причем эти размеры выбираются исходя из требований прикладной задачи. Правильный выбор параметров может привести и к снижению высокочастотного шума.

Алгоритм статистической дифференциации был в 1976 г. предложен Уоллесом [Pratt, 2007] и определяется выражением

$$J(x, y) = \alpha m_d + (1 - \alpha) \left(I(x, y) + \langle I(x, y) \rangle \right) \frac{A \sigma_d}{A \sigma(x, y) + \sigma_d}, \quad (1)$$

где $I(x, y)$ и $J(x, y)$ — исходное и результирующее изображения; $\langle I(x, y) \rangle$ — изображение, сглаженное по локальной окрестности; $\sigma(x, y) = \left\langle \left(I(x, y) - \langle I(x, y) \rangle \right)^2 \right\rangle$ — среднеквадратичное отклонение яркости; m_d, σ_d — желаемые средняя яркость и средний разброс интенсивностей в изображении; $\alpha \in [0, 1]$; A — предельный коэффициент усиления деталей.

В формуле (1) подразумеваются средние по прямоугольной или круглой окрестности радиуса R значения, полученные с помощью линейной фильтрации, например — сверткой с гауссовым ядром. Использование таких средних значений приводит к размазыванию сглаженного изображения и появлению двойных границ на улучшенном изображении.

МНОГОМАСШТАБНАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ

Рассмотрим последовательность изображений: $I_0(x, y), I_1(x, y), \dots, I_k(x, y)$. Здесь $I_0(x, y)$, — исходное изображение; $I_k(x, y) = \langle I_{k-1}(x, y) \rangle_k$, $k = 1..K$, где $\langle \cdot \rangle_k$ — некоторый оператор сглаживания, возможно нелинейный, с характерным радиусом R_k , причём $R_k < R_{k+1}$. Обозначим разностные изображения $D_k(x, y) = I_k(x, y) - I_{k-1}(x, y)$ и введем их средний размах как $\sigma_k(x, y) = \left\langle D_k^2(x, y) \right\rangle_G$. Среднее значение здесь вычисляется всегда при помощи свёртки с функции Гаусса для того, чтобы полученная величина была статистически обоснована, что подчеркивается в формуле индексом G . Предлагается следующее многомасштабное обобщение алгоритма

$$J(x, y) = \alpha m_d + (1 - \alpha) I_K(x, y) + \sum_{k=0}^{K-1} D_k(x, y) \left(B_k + \frac{A_k \sigma_{k,d}}{A_k \sigma_k(x, y) + \sigma_{k,d}} \right). \quad (2)$$

Особенность алгоритмов повышения детальности (sharpening) по локальной окрестности — усиление деталей с характерным размером порядка этой окрестности и менее. Адаптивное определение коэффициента усиления на основе среднего размаха изображения в пределах локальной окрестности в большей степени усиливает детали близкие к диаметру окрестности. Формула (2) позволяет избирательно подчеркнуть детали $K - 1$ разных характерных размеров, причем эти размеры выбираются исходя из требований прикладной задачи. Установка малого коэффициента при $k = 0$ в случае модели слабо коррелированного в пространстве шума приводит к сохранению шумов или даже снижению уровня шума, не

мешая усилению более крупных деталей при больших k . Заметим, что при разных k могут использоваться различные алгоритмы сглаживания.

Для вычисления сглаженных изображений может использоваться свертка с функцией Гаусса. Однако в этом случае, вследствие размытия при сглаживании, на границах объектов с сильно различающимися яркостями могут появляться ореолы. Поэтому в работе для сглаживания используются комбинации ранговых алгоритмов, не размывающих края объектов, и свёрток с функцией Гаусса. В работе рассматривались ранговые алгоритмы, в частности усреднение по K_{NV}-окрестности [Ярославский, 1987] текущего пикселя и их быстрые реализации на основе многомасштабного представления гистограмм и контроля изменения гистограмм по мере добавления и удаления точек при сдвиге окна локальной окрестности.

МНОГОМАСШТАБНЫЕ ГИСТОГРАММЫ

Многомасштабная гистограмма (рис. 1) на самом грубом (верхнем) уровне L_0 содержит общее количество точек локальной окрестности и сумму их яркостей (отрезок от 0 до I_{\max} , максимальной интенсивности изображения). На уровень ниже (L_1), гистограмма содержит то же самое для ~ 2 -х отрезков (от 0 до $I_{\max}/2$ и от $I_{\max}/2+1$ до I_{\max}), на уровне L_2 — для 4-х отрезков. То есть если идти «снизу», то элемент верхнего уровня включает в себя соответствующие два элемента нижнего уровня. Самый нижний уровень — обычная гистограмма, в которой каждый элемент соответствует одному значению интенсивности. В ней хранится число отсчетов каждой яркости в окрестности. Номер этого уровня совпадает с количеством бит, которым представляется интенсивность изображения L_{\max} .

При построении гистограммы для пикселя в соответствующую ячейку на каждом уровне детальности одновременно добавляется/вычитается единица. Так, для изображения в 256 градаций серого — сразу на 8 уровней, т. е. сложность построения гистограммы возрастает примерно в 8 раз. Однако это усложнение в дальнейшем позволяет существенно ускорить вычисление разнообразных средних величин: с логарифмической сложностью $O(L_{\max})$ вместо линейной $O(2^{L_{\max}})$.

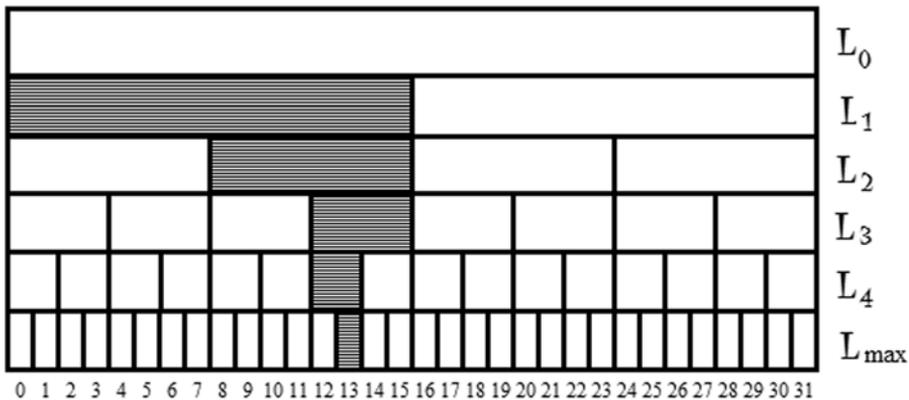


Рис. 1. Многомасштабная гистограмма

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2. представлено сравнение одномасштабной статистической дифференциации со сглаживанием сверткой с функцией Гаусса и ранговыми алгоритмами. Алгоритм статистической дифференциации работает с параметрами $A = 8$, $m_d = 128$, $\sigma_d = 85$, $\alpha = 0,25$. При вычислении среднего по KNV окрестности полагалось $R = 12,5$; $K = 0,2N$, где N — общее количество пикселей в локальной окрестности.

Применение стандартной статистической дифференциации со сглаживанием сверткой с функцией Гаусса (рис. 2б) существенно поднимает детали изображения. Однако использование сглаживания с размытием приводит к образованию ореолов вокруг объектов с сильно различающейся яркостью и созданию градиентной закраски на краях однородно окрашенных объектов. При использовании ранговых алгоритмов (рис. 2в) изображение выглядит более естественно, без излишнего пересветления и затемнения, но сохраняются «переусиления» на краях объектов. Но при обычной статистической дифференциации усиливаются все мелкие детали с размером меньше радиуса окрестности, в том числе и шумы.

Результаты многомасштабной статистической дифференциации представлены на рис. 3. Для улучшения изображения при помощи вычисления средне-



Рис. 2. Улучшение изображения: а — исходное изображение; б — Гаусс; в — среднее по KNV



Рис. 3. Улучшение изображения: а — исходное изображение; б — Гаусс; в — алгоритм KNV

го по KNV использовались 5 окрестностей радиусов $R_1 = 1,5$; $R_2 = 2,5$; $R_3 = 6,5$; $R_4 = 15,5$; $R_5 = 22,5$; $K = 1/4NR$. При вычислении среднего путём свёрток с Гауссом исходное изображение сначала сглаживалось при помощи KNV окрестности для удаления шумов ($R_1 = 4,5$; $K = K = 1/4N$). Затем с полученным изображением по четырём окрестностям производилась свёртка с функцией Гаусса со следующими параметрами: $\sigma_2 = 3$; $\sigma_3 = 5$; $\sigma_4 = 7$; $\sigma_5 = 15$. Общие параметры для обоих методов улучшения: $m_d = 128$; $\alpha = 0,25$; $A_1 = 1$; $A_2 = 4$; $A_3 = 5$; $A_4 = 7$; $A_5 = 5$; $\sigma_d = 55$. Выбор коэффициент $A_1 = 1$ гарантирует, что шумы, которые подавляются на изображении при вычислении среднего по KNV окрестности, не будут снова усилены на результирующем изображении.

Применение многомасштабной статистической дифференциации позволяет одновременно повысить контраст изображения и подавить мелкомасштабный шум. Однако при вычислении среднего только с использованием ранговых алгоритмов результирующие изображения получаются слабоконтрастными. Поэтому наилучшим вариантом представляется комбинирование свёрток с Гауссом и ранговых алгоритмов при вычислении среднего в многомасштабной статистической дифференциации.

Заключение

Разработан алгоритм многомасштабной статистической дифференциации, позволяющий избирательно подчеркнуть детали выбранных размеров. Для сглаживания внутри него предложено использовать комбинацию ранговых алгоритмов и свёрток с Гауссом, что устраняет эффект «ореолов» на границах объектов и помогает подавить мелкомасштабные шумы.

Литература

- [Ярославский, 1987] *Ярославский Л. П.* Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. М.: Радио и связь, 1987. 296 с. : ил.
 [Pratt, 2007] *Pratt W. K.* Digital Image Processing: PIKS Scientific inside. 4th ed. Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc., Los Altos, California, 2007. 782 p.

MULTISCALE RANK STATISTICAL DIFFERENCING: ENHANCEMENT OF LOW CONTRAST AND NOISED IMAGES

M. V. Storozhilova, D. V. Yurin

*Lomonosov Moscow State University (MSU),
Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics (CMC)*

Multiscale statistical differencing algorithm is proposed for low contrast images enhancement. Using multiscale approach we sharpen details of different sizes simultaneously. If we use small amplification coefficient for smallest environment size, the algorithm demonstrates denoising capability. We also propose fast rank algorithms based on multiscale histograms and their application for smoothed images computation during multiscale statistical differencing.

Keywords: statistical differencing, rank algorithms, fast mean by KNV-environment, multiscale histograms.

Storozhilova Maria Vadimovna — student at chair of mathematical physics, e-mail: mariastorozhilova@gmail.com.

Yurin Dmitry Vladimirovich — senior researcher at laboratory of mathematical methods of image processing, PhD, e-mail: yurin_d@inbox.ru.

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ И ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Н. В. Ким, П. В. Коссов, С. М. Михеев

*Московский авиационный институт
(Государственный технический университет, МАИ), Москва*

Рассмотрена проблема улучшения качества предъявляемых оператору ТВ и ТПВ изображений при наблюдении наземных объектов. При этом на первом этапе решается задача повышения качества ТПВ изображений, включая повышение разрешения и качества краев, а на втором — задача совмещения ТВ и ТПВ изображений.

Ключевые слова: многоканальные системы наблюдения, суперразрешение, совмещение изображений, анализ сцен.

Введение

В современных многоканальных оптико-электронных системах наблюдения и визуализации (СНВ) оператору могут быть доступны изображения наблюдаемой сцены, полученные в различных диапазонах волн, в частности, телевизионные (ТВ) и тепловизионные (ТПВ) изображения.

В ряде работ [Костяшкин, 2011; Иванов, Смагин, 2006; Irani, Peleg, 1990] обсуждаются вопросы повышения качества ТВ, ТПВ и синтезированных ТВ и ТПВ изображений, предъявляемых оператору. Однако в большинстве случаев рассматриваемые подходы не учитывают специфику решаемых конкретных целевых задач и условий их реализации.

В представленной работе предлагаются процедуры улучшения ТПВ и синтезированного ТВ+ТПВ изображения с точки зрения повышения эффективности решения оператором целевых задач.

В первую очередь эффективность может быть повышена за счет улучшения качества предъявляемых оператору ТВ и ТПВ изображений. При этом качество изображений может оцениваться на основе измерений их различных параметров в зависимости от решаемых задач.

Например, известно, что утомляемость оператора и время принятия им решений (в задачах обнаружения и/или распознавания объектов) при наблюдении плохо сфокусированных изображений выше, чем при работе с изображениями с четкими границами объектов. В данном случае качество исходных материалов может оцениваться именно этим параметром.

При поиске и анализе поведения объектов интереса (людей, транспортных средств) на синтезированных ТВ и ТПВ изображениях эффективность работы оператора будет выше, если эти объекты будут более контрастными, чем несущественные для выполнения целевой задачи. Следовательно, повышение качества предъявляемых оператору изображений в подобных задачах должно быть связано с предварительным выделением объектов интереса.

Ким Николай Владимирович — профессор, кандидат технических наук, e-mail: nkim2003@list.ru.

Коссов Павел Валерьевич — аспирант, e-mail: kossov_paul@mail.ru.

Михеев Сергей Михайлович — аспирант, e-mail: mikheev.s.m@gmail.com.

1. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ТПВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предлагаемая методика повышения качества ТПВ изображений включает процедуры повышения разрешения исходных изображений и качества краев.

Для повышения качества краев предлагается реализовать новый подход, основанный на использовании информации о наличии на изображении искусственных объектов (зданий и сооружений), границами которых являются отрезки прямых линий.

Предполагается, что СНВ оснащена собственной системой навигации, вычислителем и памятью, с цифровой картой наблюдаемой местности, позволяющих определять положение СНВ.

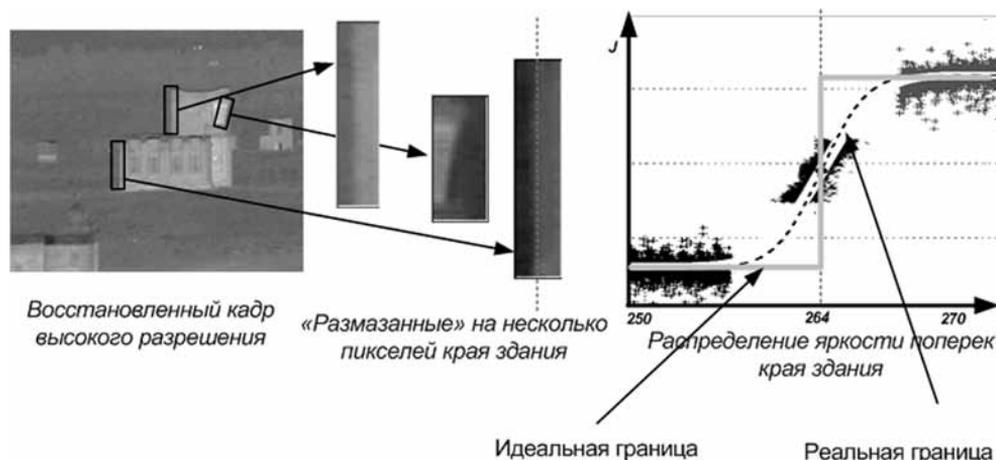


Рис. 1. Краевые эффекты на тепловизионном изображении высокого разрешения



Рис. 2. Схема алгоритма локализации обрабатываемых областей

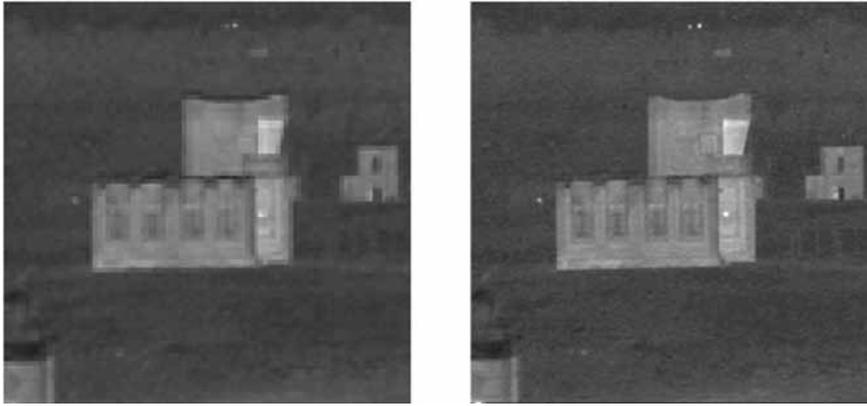


Рис. 3. Исходное тепловизионное изображение низкого разрешения (слева) и увеличенное в четыре раза методом суперразрешения с компенсацией краевых эффектов (справа)

В представленной работе увеличение разрешения ТПВ реализуется на основе методов суперразрешения [Irani, Peleg, 1990].

При увеличении разрешения ТПВ изображений возможно усиление краевого эффекта — размывания границ наблюдаемых объектов, в частности искусственных (рис. 1). Восстановление этих границ на основе традиционного использования, например, высокочастотных фильтров, может привести к существенному искажению формы полученных линий по отношению к истинным (идеальным) границам изображений объектов.

Выделение этих линий может быть реализовано на основе анализа наблюдаемых сцен. Далее происходит двухстороннее восстановление окраски приграничных областей фона и объекта на основе сглаживания их яркостей. Схема алгоритма представлена на рис. 2.

На рис. 3 представлен результат компенсации краевых эффектов. Как видно из приведенного примера, предлагаемый подход позволяет заметно улучшить качество восстанавливаемых изображений.

2. СОВМЕЩЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предлагаемая методика совмещения в многоканальных системах наблюдения состоит из двух этапов: пространственного совмещения и синтеза изображений.

Пространственное совмещение ТПВ и ТВ изображений включает: приведение формата ТПВ к формату ТВ изображения и поиск параметров трансформации $T = (S, dx, dy)$, обусловленной конструктивным несовпадением визирных осей каналов и ошибкой выставки требуемого угла зрения.

Алгоритм оценки смещений основан на поиске максимума функции взаимной информации (ВИ) — статистической функции двух случайных величин [Blum, 2006]. Вычисление функции осуществляется по блокам A и B — фрагментам ТВ и ТПВ изображений соответственно.

$$I(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B), \quad (1)$$

где: $I(A, B)$ — взаимная информация блоков; $H(A)$, $H(B)$ — собственная энтропия изображений по Шеннону; $H(A, B)$ — совместная энтропия.

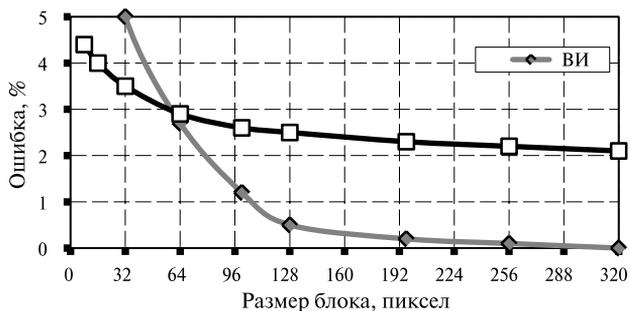


Рис. 4. Влияние размера блока на точность оценки

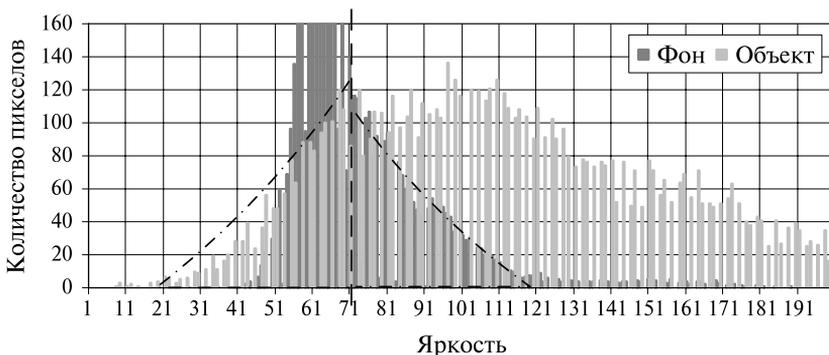


Рис. 5. Сегментация ТПВ изображения

На рис. 4 представлены зависимости величины ошибки от размера блока для критерия взаимной информации и корреляционной функции.

Применен локальный синтез полноцветного ТВ изображения и выделенных на ТПВ изображении объектов интереса по схеме с приоритетом ТВ изображения [Костяшкин, 2011].

Для сегментации ТПВ изображения предлагается использовать статистические методы распознавания [Ким, 2001]. Условные плотности оценивались с помощью интерполяции гистограмм для фрагментов объекта и фона (рис. 5), полученных из набора различных типовых сцен. Для определения положения решающей поверхности был использован критерий Фишера.

Более контрастно выделяются движущиеся объекты интереса. Для данной цели предложен метод определения межкадрового движения на основе алгоритма Лукаса – Канаде.

На рис. 6 представлены исходные ТПВ и ТВ-кадры и результаты синтеза.

Заключение

Предложена методика повышения качества ТПВ изображения, построенная на методе суперразрешения и новом методе компенсации краевых эффектов за счет использования информации о наличии на изображении искусственных объектов. Качество границ объектов повысилось в 8...13 раз по сравнению с исходным после применения суперразрешения.

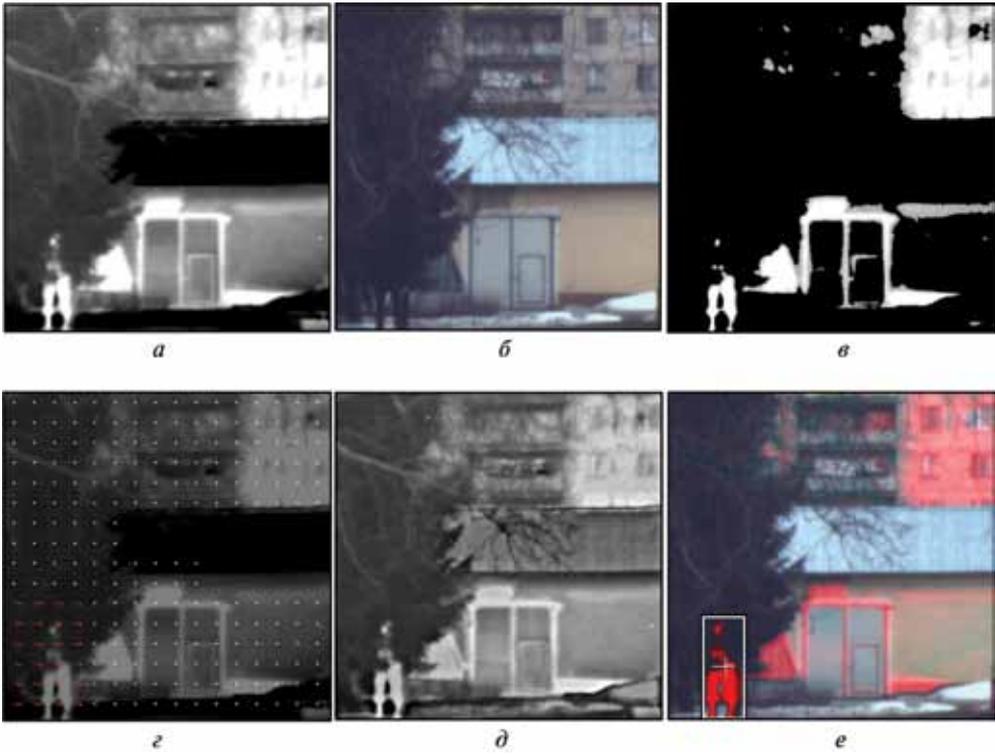


Рис. 6. Исходные ТПВ и ТВ-кадры: *а* — исходный ТПВ кадр; *б* — исходный ТВ-кадр; *в* — результат сегментации ТПВ-кадра; и результаты синтеза: *г* — по пирамиде Лапласианов; *д* — алгоритм с приоритетом ТВ; *е* — предлагаемый алгоритм локального слияния

На основе проведенных вычислительных экспериментов показано, что критерий взаимной информации позволяет решать задачу пространственного совмещения ТПВ и ТВ изображений в среднем в 5 раз точнее корреляционных алгоритмов.

В рамках решаемой целевой задачи повышена информативность ТПВ и ТВ изображений за счет их локального синтеза, основанного на предварительном поиске на ТПВ изображении объектов интереса.

Литература

- [Иванов, Смагин, 2006] *Иванов Е. Л., Смагин М. С.* Слияние изображений в многоканальной системе наблюдения местности // Датчики и системы. 2006. № 11. С. 6–9.
- [Ким, 2001] *Ким Н. В.* Обработка и анализ изображений в системах технического зрения. М.: МАИ, 2001. 163 с.
- [Костяшкин и др., 2011] *Костяшкин Л. Н., Бабаев С. И., Логинов А. А., Павлов О. В.* Технология систем улучшенного / синтезированного зрения для управления летательными аппаратами // Техн. зрение в системах управления мобильными объектами-2010: Тр. научно-техн. конф.-семинара. Вып. 4 / Под ред. Р. Р. Назирова. М.: КДУ, 2011. С. 45–56.

- [Blum, 2006] *Blum R. S.* Multi-Sensor Image Fusion and Its Applications. / Blum R. S., Liu Z. // Signal Processing and Communications. 2006. С. 40–42.
- [Irani, Peleg, 1990] *Irani M., Peleg S.* Super resolution from image sequences // Department of Computer Science the Hebrew University of Jerusalem. Israel. June 1990.

TELEVISION AND THERMAL IMAGE INFORMATIVITY ENHANCEMENT

N. Kim, P. Kossov, S. Mikheev

Moscow aviation institute (State technical university, MAI), Moscow

The problem of television and thermal images informativity enhancement for ground target survey by human-operator is considered. On the first step the resolution of the thermal image is increased and edges are improved. On the second one thermal and television images are fused.

Keywords: multisensor systems, super-resolution, image fusion, scene analysis.

Kim Nikolay V. — professor, PhD, e-mail: nkim@list.ru.

Kossov Pavel V. — postgraduate, e-mail: kossov_paul@mail.ru.

Mikheev Sergey M. — postgraduate, e-mail: mikheev.s.m@gmail.com.

УСТРАНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ АВИАЦИОННОГО НОСИТЕЛЯ НА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В. В. Егоров¹, А. А. Ильин², А. П. Калинин³, А. И. Родионов²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт

космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва

² Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр «Реагент»
(ЗАО НТЦ «Реагент»), Москва

³ Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского
Российской академии наук (ИПМех РАН), Москва

Описан способ устранения влияния динамики движения авиационного носителя на изображения земной поверхности при щелевого гиперспектрометра (типа pushbroom), осуществляющего сканирование узкой полосой области обзора. Коррекция изображений основана на использовании дополнительных данных, получаемых видеокамерой, работа которой синхронизирована с гиперспектральной съемкой. Разработан алгоритм коррекции изображений, предусматривающий определение смещения и поворота каждого последующего относительно предыдущего кадра изображения; построение траектории движения авианосителя; попиксельное исправление гиперспектральных изображений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям.

Ключевые слова: гиперспектрометр, авианоситель, изображение, искажение, видеокамера, эволюция авианосителя, мозаика кадров, синхронизация.

В последнее время зондирование земной поверхности с помощью гиперспектрометра, установленного на авиационный носитель, находит все большее применение [Непобедимый и др., 2004]. Наиболее часто для этого применяют щелевой гиперспектрометр (в английской терминологии типа pushbroom), осуществляющий сканирование узкой полосой области обзора (рис. 1).

При зондировании земной поверхности гиперспектрометром, размещенным на самолете, вертолете или дельтаплане, возникают искажения получаемого гиперспектрального изображения вследствие сложной траектории движения авиационного носителя. На рис. 1а показаны результаты видеосъемки участка поверхности, а на рис. 1б его гиперспектральное изображение для длины волны 537 нм, полученное непосредственно с гиперспектрометра. На этом изображении видны сильные искажения, связанные с маневрированием авиационного носителя.



а



б

Рис. 1. Результаты съемки с борта авиационного носителя: а — видеосъемка участка поверхности Земли, б — неисправленное гиперспектральное изображение этого же участка

Для устранения геометрических искажений в задачах дистанционного зондирования Земли часто используется так называемая физическая стабилизация. Она предусматривает установку на борт летательного аппарата дорогостоящей навигационной аппаратуры и гиropлатформы, которая должна удерживать оптическую ось зондирующего устройства в строго вертикальном положении. Существенные недостатки такой стабилизации — высокая стоимость и большой вес гиropлатформы.

Авторами разработан метод исправления гиперспектральных изображений. Впервые его описание было приведено в работе [Орлов, 2008]. Метод основан на одновременном использовании синхронных измерений гиперспектрометра и видеокамеры.

Алгоритм процесса обработки совместных измерений гиперспектрометра и видеокамеры показан на рис. 2.

На основе результатов полученных видеокамерой «Данные видеокамеры» проводится определение смещения и поворота каждого последующего относительно предыдущего кадра и полученные результаты помещаются в файл «Данные о взаимных смещениях кадров».

Перемещение одного кадра относительно другого определяется тремя параметрами: величинами сдвигов по двум ортогональным направлениям и углом поворота относительно центра кадра. Эти параметры определяются с помощью поиска экстремума некоторого выражения (*функционала*), которое тем или иным способом вычисляет отличие изображения одного кадра относительно другого. Для эффективного решения поставленной задачи следует учитывать, что поиск параметров движения идет в плоскости. Причем, это движение малое, поскольку анализируются два соседних кадра.

На современных ПК эта задача решается за вполне приемлемое время, поскольку отыскивается несколько экстремумов функции только двух переменных. После этого, анализируя распределение сдвигов на изображении, вычисляется угол поворота $\Delta\alpha$ и окончательные величины сдвигов Δx , Δy .

Вышеописанным способом попарно анализируются все кадры цифровой видеосъемки. Для каждой пары вычисляются величины Δx_i , Δy_i , $\Delta\alpha_i$, i — номер кадра. Далее вычисляется положение и ориентация кадра относительно заданной системы координат, которая в простейшем случае задается относительно первого кадра видеокамеры для выбранного участка зондируемой поверхности. После определения смещений соседних кадров видеокамеры необходимо осуществить построение траектории и наложение кадров на мозаику в соответствии с траекторией. Последовательность положений центров кадров и является искомой траекторией движения области обзора видеокамеры. Сама последовательность наложенных кадров с учетом смещения и поворота называется «мозаикой кадров» (рис. 3).

Положение щели гиперспектрометра относительно области обзора видеокамеры известно. Это позволяет вычислить положение линии обзора гиперспектрометра на мозаике снимков для каждого кадра. Последовательность точек положения двух концов щели гиперспектрометра задает траекторию движения области обзора гиперспектрометра.

Зная траекторию щели гиперспектрометра, можно провести геометрическую коррекцию гиперспектральных данных. Эта коррекция заключается в том, что измерения гиперспектрометра также укладываются в гиперкуб, пространственные координаты которого задаются в той же системе координат, что и координаты

наты мозаики снимков. Данные гиперспектрметра преобразуются с помощью найденного геометрического преобразования данных, в результате чего создается «Геометрически скорректированное изображение сканирующего сенсора». Рисунок 4 поясняет процедуру перестроения исходного гиперспектрального изображения в исправленное.

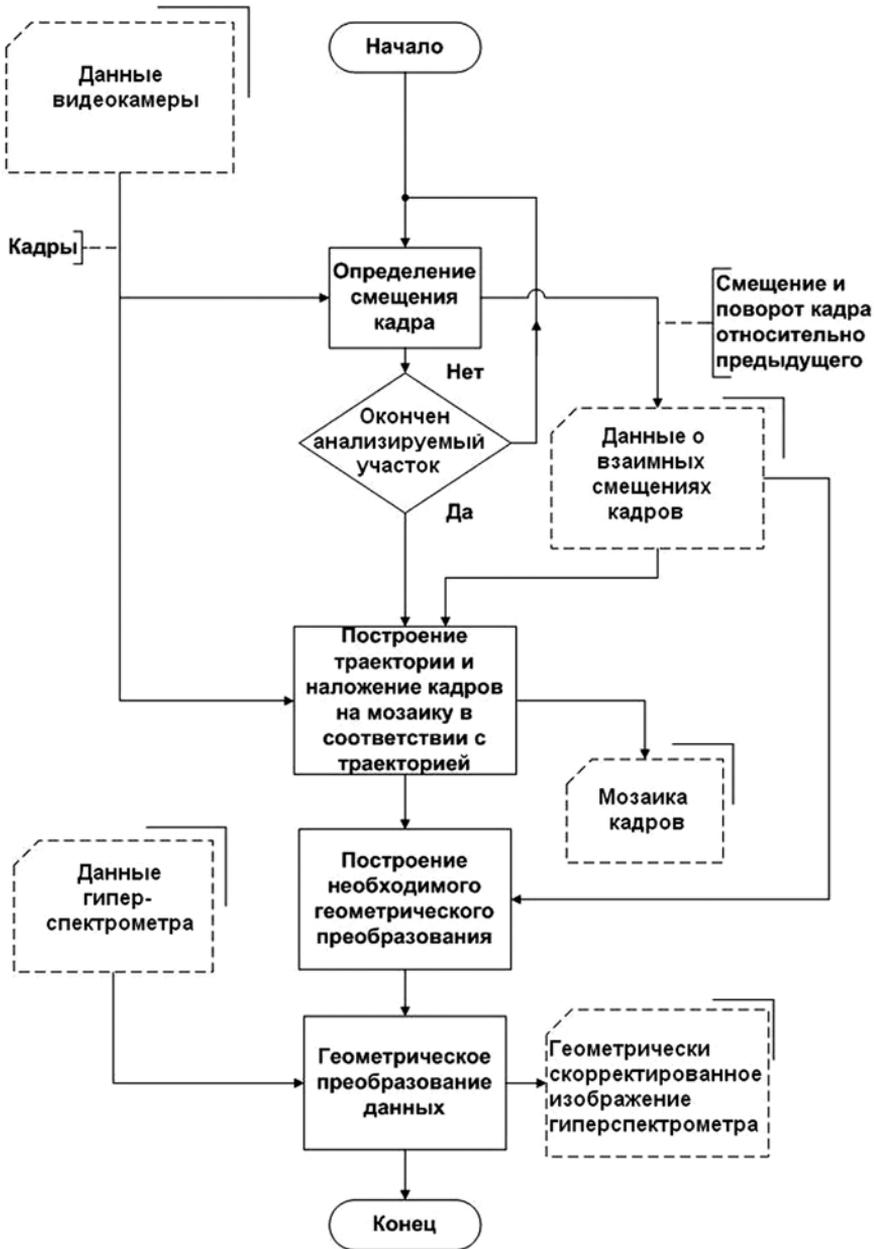


Рис. 2. Алгоритм исправления искажений

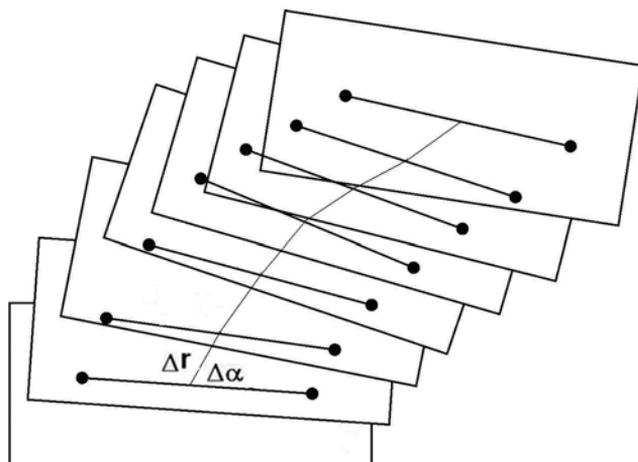


Рис. 3. Рисунок, поясняющий построение траектории полета авианосителя и мозаики кадров

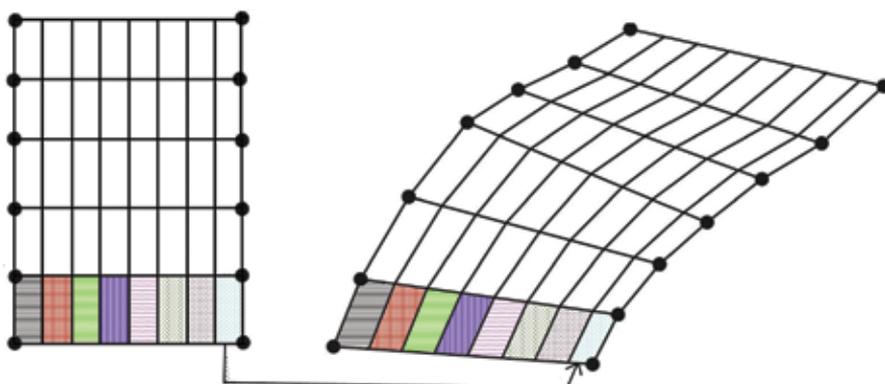


Рис. 4. Перестроение исходного гиперспектрального изображения в исправленное

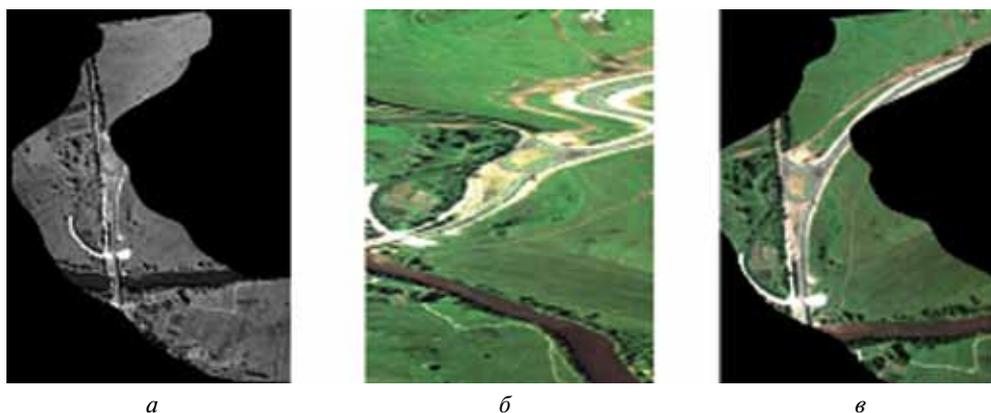


Рис. 5. Демонстрация исправления гиперспектрального изображения

В результате такого перестроения создается геометрически скорректированное гиперспектральное изображение.

Спектры одного гиперспектрального кадра располагаются вдоль линии обзора гиперспектрометра с учетом его положения относительно системы координат. В памяти компьютера пространственные координаты гиперкуба должны быть представлены в виде прямоугольной сетки. Для построения геометрически правильного гиперкуба, необходимо задать спектры в пикселях, которые составляют прямоугольную сетку. В каждом пикселе спектр можно задать, взяв спектр ближайшего пикселя среди пикселей гиперспектрометра, положенных на систему координат. Этот метод называется методом ближайшего соседа.

Преимущество метода геометрической коррекции в том, что, используя только видеокамеру, работа которой была синхронизирована с работой гиперспектрометра, удастся скорректировать как перемещения летательного аппарата, так и его колебания относительно центра масс.

Допущение, что каждый последующий видеокادر только сдвинут и повернут относительно предыдущего в плоскости изображения, достаточно хорошо работает на практике. Если описываемая система используется для решения задач дистанционного зондирования Земли, то это предположение справедливо при условии, что высота летательного аппарата постоянна, и углы отклонения оптических осей двух сенсоров от вертикали невелики. В этом случае можно считать, что при вращательном движении летательного аппарата (небольших его колебаниях) область обзора гиперспектрометра не меняет своей формы, а только перемещается по зондируемой поверхности. При использовании описываемой системы для построения изображения зондируемой поверхности знание динамики самого летательного аппарата не требуется, необходимо только знание траекторий областей обзора используемых приборов.

Рисунок 5 иллюстрирует работу метода устранения геометрических искажений изображений с гиперспектрометра, связанных со сложной траекторией движения носителя сенсора. На рис. 5а показан пример мозаики, полученный видеокамерой. На рис. 5б приводится изображение по результатам обработки первичных данных с гиперспектрометра, искаженное вследствие маневров летательного аппарата. Результаты устранения геометрических изображений целевого сенсора представлены на рис. 5в.

На описываемый метод исправления гиперспектральных изображений, связанных с динамикой движения авиационного носителя был получен патент [Ильин и др., 2009].

Литература

- [Ильин и др., 2009] *Ильин А. А., Калинин А. П., Орлов А. Г.* и др. Способ устранения искажений изображений дистанционного зондирования, связанных со сложной траекторией движения носителя сенсора изображения. Патент № 2411449. Заявка 2009133433. Дата подачи заявки 08.09.2009. Оpubл. 10.02.2011. Бюл. № 4.
- [Непобедимый и др., 2004] *Непобедимый С. П., Родионов И. Д., Воронцов Д. В.* и др. // Докл. Акад. наук. 2004. Т. 397. № 1. С. 45–48.
- [Орлов, 2008] *Орлов А. Г.* Разработка и исследование авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего ИК-диапазонов: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.01. ИКИ РАН. М., 2008. 163 с.

REMOVAL OF AIRCRAFT DYNAMIC INFLUENCE ON THE TERRAIN IMAGES OBTAINED BY MEANS OF HYPERSPECTROMETER

V. V. Egorov¹, A. A. Ilyin², A. P. Kalinin³, A. I. Rodionov²

¹ *Space Research Institute (IKI RAN), Moscow*

² *Stock Company, Reagent Scientific Engineering Centre (R&D "Reagent"), Moscow*

³ *Ishlinsky Institute of Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences (IPMech RAS), Moscow*

The technique for removal of aircraft dynamic influence on the terrain images obtained by means of pushbroom hyperspectrometer. The image correction is based on the additional data using that are obtained by video camera synchronous with the hyperspectral survey. The algorithm of image correction anticipates determination of bias and angular rotation for each subsequent frame respectively previous image; composition of aircraft trajectory; pixel by pixel correction of hyperspectral image.

Keywords: hyperspectrometer, aircraft, image, distortion, video camera, aircraft evolution, mosaic, synchronization.

Egorov Victor Valentinovich — senior researcher, PhD, e-mail: victor_egorov@mail.ru.
Ilyin Andrey Alexandrovich — senior researcher, PhD, e-mail: andreyilyn@mail.ru.
Kalinin Alexander Petrovich — leading researcher, PhD, senior researcher, e-mail: kalinin@ipmnet.ru.
Rodionov Alexey Igorevich — technical director, candidate of science, e-mail: arodionov@reagent-
rdc.ru.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ КОРРЕКЦИЯ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ СТЕРЕОВИДЕНИЯ

М. Н. Фаворская, Д. И. Пьянков, А. Н. Горошкин

*Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева (СибГАУ), Красноярск*

Предлагается алгоритм пространственно-временной коррекции видеопоследовательностей в задачах стереовидения, обеспечивающий синхронную запись для получения стереовидеопоследовательности. Представлены результаты тестирования методов интерполяции и совмещения для ряда тестовых видеопоследовательностей.

Ключевые слова: пространственно-временная коррекция, интерполяция, стереовидеопоследовательность.

Получение стереовидеопоследовательностей без использования специализированного дорогостоящего оборудования порождает ряд проблем, связанных, в основном, с несинхронной записью видеопоследовательностей из-за различного времени доступа к устройствам хранения информации, несинхронного старта и других факторов. Коррекция видеопоследовательностей с помощью видеоредакторов — трудоемкий и утомительный процесс. Одним из решений может быть разработка алгоритма пространственно-временной коррекции двух видеопоследовательностей.

Стереосъемка представляет собой получение подобных, но не идентичных видеопоследовательностей с двух точек съемки относительно объекта. В идеальном случае оси объективов должны быть параллельны. При нормальной стереосъемке базис видеосъемки приблизительно равен расстоянию между центрами зрачков человеческого глаза (примерно 65 мм). При совмещении двух видеопоследовательностей, снятых с левой и правой видеокамер, получается стереовидеопоследовательность, которую можно преобразовать под любой метод просмотра: анаглиф, линейная поляризация, метод затворных ЖК-панелей и др.

АЛГОРИТМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ КОРРЕКЦИИ

Алгоритм пространственно-временной коррекции включает два вложенных цикла по генерации промежуточных кадров и совмещении текущего кадра с интерполированными кадрами:

Шаг 1. Предварительное преобразование видеопоследовательностей в YUV -пространство для извлечения компоненты яркости Y . Функция яркости используется для нахождения векторов движения.

Шаг 2. Цикл 1 (шаги 2–4). Произвольным образом выбирается одна из видеопоследовательностей и осуществляется преобразование частоты кадров на основе интерполяции.

Фаворская Маргарита Николаевна — доцент, кандидат технических наук, e-mail: favorskaya@sibsau.ru.

Пьянков Дмитрий Игоревич — аспирант, e-mail: pyankovdi@sibsau.ru.

Горошкин Антон Николаевич — старший преподаватель, кандидат технических наук, e-mail: neobit@sibsau.ru.

Шаг 3. Цикл 2 (шаги 3–4). Осуществляется совмещение текущего кадра базовой видеопоследовательности с дополнительными кадрами преобразованной видеопоследовательности, выбирается наилучший кадр.

Шаг 4. Генерация кадра новой видеопоследовательности, получаемой из текущего совмещенного кадра, и запись его в выходной поток.

Шаг 5. Формирование выходной видеопоследовательности.

Такой алгоритм обеспечивает коррекцию видеопоследовательности относительно базовой в пространственно-временной области. Рассмотрим основные шаги приведенного алгоритма более подробно.

Получение интерполированных кадров

Пусть дана видеопоследовательность $\mathbf{VS}_{in}(\mathbf{L})|_{z=t}$, где $t \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ — номер кадра, z — общее количество кадров. Между каждыми соседними кадрами необходимо вставить определенное число кадров, заданное параметром $n \in \{2, 3, \dots\}$, показывающим, во сколько раз требуется увеличить частоту кадров исходной видеопоследовательности. После преобразования частоты кадров выходная видеопоследовательность $\mathbf{VS}_{out}(\mathbf{L})|_{z=nt}$ имеет вид:

$$\mathbf{VS}_{in}(\mathbf{L})|_{z=t} \xrightarrow{A_c} \mathbf{L}_t, \mathbf{L}_{t+1} \xrightarrow{A_l} \mathbf{L}_t, \mathbf{L}_1^I, \mathbf{L}_2^I, \dots, \mathbf{L}_l^I, \mathbf{L}_{t+1} \xrightarrow{A_f} \mathbf{VS}_{out}(\mathbf{L})|_{z=nt}, \quad (1)$$

где Sel — выбор текущего \mathbf{L}_t и последующего \mathbf{L}_{t+1} кадров; A_l — алгоритм интерполяции кадров; Ins — вставка интерполированных кадров \mathbf{L}_l^I , $l = 2(n-1)$; l — количество интерполированных кадров; z — общее число кадров.

Приведем общую схему получения интерполированных кадров:

- рассматривается текущий кадр \mathbf{L}_t и последующий кадр \mathbf{L}_{t+1} видеопоследовательности $\mathbf{VS}_{in}(\mathbf{L})$;
- производится оценка движения согласно выбранному алгоритму;
- вычисляется поле векторов движения;
- между текущим кадр \mathbf{L}_t и последующим кадр \mathbf{L}_{t+1} строятся интерполированные кадры $\mathbf{L}_1^I, \mathbf{L}_2^I, \dots, \mathbf{L}_l^I$;
- формирование выходной последовательности $\mathbf{VS}_{out}(\mathbf{L})$.

Алгоритм оценки движения

Получение интерполированных кадров основано на оценке движения регионов последующего кадра относительно текущего. Для этого была использована модификация метода сопоставления блоков — поиск по шаблону, что обеспечило работу в реальном режиме времени. Общую схему оценки движения можно представить в следующем виде:

- 1) рассматривается текущий кадр \mathbf{L}_t и последующий кадр \mathbf{L}_{t+1} ;
- 2) кадры \mathbf{L}_t и \mathbf{L}_{t+1} разбиваются на равные блоки B , размер которых кратен 2 и определяется параметром sb ;
- 3) на кадре \mathbf{L}_{t+1} находится сумма s значений яркостей пикселей данного блока B , определяемая выражением

$$s_B = \sum_{x=0}^{sb-1} \sum_{y=0}^{sb-1} Y_B(x, y), \quad (2)$$

где $Y_B(x, y)$ — функция яркости в точке с координатами (x, y) для блока B ;

4) определяется наличие движение между кадрами L_t и L_{t+1} для заданного блока B по пороговому значению err_B

$$err_B = (255^2 - Y_{lim}^2) \times sb^2, \quad (3)$$

где $Y_{lim} \in [0, 255]$ — параметр, обозначающий предельное значение яркости пиксела (x, y) блока B размером $sb \times sb$. Чем больше величина Y_{lim} , тем меньше пороговое значение err_B . Если $s_B > err_B$, то имеется движение в блоке (переход к шагу 5). Если $s_B \leq err_B$, то движение отсутствует, возврат к шагу 3 (выбор следующего блока).

5) задается параметр смещения $shift(p)$, где p — число пикселей, определяющих смещение;

6) на кадре L_{t+1} находятся соседние блоки по диагоналям, вертикали и горизонтали относительно рассматриваемого блока B с кадра L_t , смещенные от этого блока на величину $shift(p)$;

7) на кадре L_t аналогично находятся суммы значений пикселей соседних блоков по диагоналям, вертикали и горизонтали s_B (выражение 2);

8) для принятия решения о направлении вектора движения минимизируется функция ошибки

$$move_B = \min \left(\sum_{n=0}^8 (s_B - s_{B'}) \right)^2. \quad (4)$$

Находится блок, содержащий минимальное значение ошибки. Он указывает направление вектора движения для блока B на кадре L_{t+1} ;

9) анализируются следующие блоки на кадрах L_t и L_{t+1} ; шаги 4–7 повторяются до тех пор, пока все блоки не будут просмотрены.

В результате работы алгоритма будет построено поле векторов движения. Для уменьшения времени выполнения можно рассматривать только вертикальное и горизонтальное направления, но вероятность правильного нахождения поля векторов в этом случае уменьшается.

АЛГОРИТМ ИНТЕРПОЛЯЦИИ КАДРОВ

Алгоритм поблочной интерполяции кадров имеет следующий вид:

1) рассматривается текущий кадр L_t и последующий кадр L_{t+1} с найденным вектором движения $move_B$ для блока B ;

2) получение плавных интерполированных кадров для компоненты YUV -пространства. Производится попиксельное сравнение в блоках B и B' текущего и последующего кадров соответственно (линейная интерполяция):

$$C_{Y'} = C_Y + (C'_Y - C_Y)\eta, \quad \eta \in [0, 1], \quad (5)$$

где C_Y и C'_Y — значения цветовой компоненты Y на текущем L_t и последующем L_{t+1} кадрах в блоках; $C_{Y'}$ — результат интерполяции по компоненте Y ; h — параметр, задающий линейное смещение пикселей на каждом интерполированном кадре;

3) шаг 2 повторяется для цветových компонент U, V ;

4) шаги 2–3 повторяются до тех пор, пока не будут интерполированы все блоки. Таким образом, будет получено n интерполированных кадров.

АЛГОРИТМ СОВМЕЩЕНИЯ КАДРОВ

Алгоритм заключается в сравнении интерполированных кадров левой видеопоследовательности L_i с кадром R_i правой видеопоследовательности и выборе наиболее подходящего интерполированного кадра. Приведем алгоритм совмещения кадров:

1) осуществляется выборка интерполированных кадров левой видеопоследовательности и соответствующий кадр правой видеопоследовательности;

2) находится попиксельная межкадровая разность с помощью функции, определяющей пиковое отношение сигнал/шум [Пьянков, Горошкин, 2010]:

$$psnr(l) = 20 \log_{10} \frac{MAX}{\sqrt{MSE}}, \quad (6)$$

где $psnr(l)$ — значение схожести между интерполированным кадром L_i левой видеопоследовательности и кадром R_i правой видеопоследовательности; $MAX \in [0, 255]$ — максимальное значение, принимаемое пикселем изображения; MSE — среднеквадратичное отклонение для каждой цветовой компоненты пикселя, вычисляемое по формуле

$$MSE = \frac{\sum_{x=0}^{h-1} \sum_{y=0}^{w-1} \left((Y_R(x, y) - Y_L(x, y))^2 + (U_R(x, y) - U_L(x, y))^2 + (V_R(x, y) - V_L(x, y))^2 \right)}{3hw},$$

где h — высота кадра; w — ширина кадра; Y_R, U_R, V_R — значения цветových компонент пикселя (x, y) на кадре R_i правой видеопоследовательности; Y_L, U_L, V_L — значения цветových компонент пикселя (x, y) на интерполированном кадре L_i левой видеопоследовательности;

3) аналогично вычисляются значения MSE и $psnr(l)$ для текущего кадра L_i левой видеопоследовательности L ;

4) находится максимальная разность $like$ между интерполированным кадром L_i (или текущим кадром L_i) и кадром R_i правой видеопоследовательности

$$like = \max(psnr(L_i, L_i), psnr(R_i)). \quad (7)$$

Наилучшей считается разность между интерполированным кадром L_i (или текущим кадром L_i), для которого выражение (7) принимает максимальное значение;

5) шаги 2–4 для последующих интерполированных кадров L_i и последующего кадра R_i повторяются до окончательного сравнения всех кадров.

Затем полученные стереокадры соединяются, образуя стереовидеопоследовательность, содержащую синхронизированную пару видеопоследовательностей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для тестирования предложенного метода использовались две видеопоследовательности: “Foreman” с быстрым движением и “Container” с медленным движением. Вычислялось среднее $PSNR$ интерполированных кадров каждой видеопоследовательности.

следовательности, тестировалось время выполнения метода. Размер смещения для поиска соседних блоков устанавливался в 1 пиксел. Оказалось, что для быстрой видеопоследовательности “*Foreman*” значения параметра *PSNR* меньше, чем для медленной видеопоследовательности “*Container*”. Это объясняется тем, что в быстрой видеопоследовательности (за счет резкой смены кадров) присутствует больше шумов, чем в медленной. Лучшая точность получается при размере блока *B*, равному 16×16 пикселов, в который попадают регионы движения и интерполирование корректно. Для медленной видеопоследовательности при увеличении блока интерполированные кадры получаются наиболее точными, так как в такой видеопоследовательности векторы движения имеют большие значения модулей.

Для обеих видеопоследовательностей время выполнения алгоритма интерполяции одинаково, так как их размеры одинаковы. При смещении между блоками в ширину блока время выполнения алгоритма уменьшается при увеличении размера блока. При смещении между блоками в 1 пиксел время выполнения алгоритма с ростом размера блока увеличивается, так как количество компьютерных операций резко возрастает.

Литература

[Пьянков, Горошкин, 2010] Пьянков Д. И., Горошкин А. Н. Оценка движения для интерполяции кадров в задачах стереовидения // Материалы 16-й Международ. научно-технич. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2010. С. 151–152.

SPATIO-TEMPORAL CORRECTION OF VIDEO SEQUENCES IN STEREOVISION

M. N. Favorskaya, D. I. Pyankov, A. N. Goroshkin

*Siberian State Aerospace University after academician M. F. Reshetnev
(SibSAU), Krasnoyarsk*

The algorithm for a spatio-temporal correction of video sequences in stereovision which provides a synchronous recording for obtaining of a stereo video sequence is suggested. Also the experimental results of interpolation and superposition methods for some test video sequences are presented.

Keywords: spatio-temporal correction, interpolation, stereo video sequence.

Favorskaya Margarita Nikolaevna — associate professor, PhD, docent, e-mail: favorskaya@sibsau.ru.
Pyankov Dmitry Igorevich — PhD-student, e-mail: pyankovdi@sibsau.ru.
Goroshkin Anton Nikolaevich — assistant professor, PhD, e-mail: neobit@sibsau.ru.

СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СУБПИКСЕЛЬНОГО УРОВНЯ РАЗРЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСФОКУСИРОВКИ

С. В. Блажевич¹, В. Н. Винтаев²,
Е. С. Селютина¹, Н. Н. Ушакова²

¹ Белгородский государственный университет (БелГУ)

² Белгородский университет потребительской кооперации (БУПК)

В работе предлагается метод увеличения разрешающей способности цифрового изображения до субпиксельного уровня (экстраразрешение), включающий расфокусировку на стадии съемки и субпиксельную интерполяцию на стадии синтеза изображения на основе серии расфокусированных изображений объекта, снятых через специальную маску, расположенную в плоскости максимальной фокусировки изображения оптической системой, имеющую решетку диафрагм, распределенных с взаимными сдвигами на заданное целое число пикселей (элементов матрицы регистрирующих детекторов). Обсуждается вопрос использования расфокусировки для повышения разрешения космической съемки поверхности Земли, осуществляемой на принципе сканера.

Ключевые слова: обработка изображения, повышение разрешающей способности, синтез изображения, субпиксельное разрешение.

Введение

В современных бортовых космических системах формирования изображений размеры пикселей применяемых матриц ПЗС, несмотря на разнообразие и эффективные методы внесения коррекций на цифровом уровне представления изображений, считаются определяющими для достигаемого линейного разрешения на местности. В зависимости от величины эффективного фокусного расстояния телескопа, установленного на спутнике, пиксел ПЗС практически проектируется на поверхность Земли с гигантским увеличением по размерам, определяя, таким образом, достижения отечественной космической индустрии в разрешающей способности космических снимков, составляющие в лучшем случае 1 м. Не дожидаясь очередной волны модернизации ПЗС, удастся, тем не менее, формировать изображение с существенно меньшей апертурой «наземного» пиксела за счет использования субпиксельных технологий [Блажевич и др., 2010].

Блажевич Сергей Владимирович — заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники факультета математики и информационных технологий, доктор физико-математических наук, e-mail: blazh@bsu.edu.ru.

Винтаев Виктор Николаевич — доцент кафедры информационных систем и технологий факультета информационных систем и защиты информации, кандидат технических наук, e-mail: viktor.vn2010@yandex.ru.

Селютина Евгения Сергеевна — аспирант кафедры информатики и вычислительной техники факультета математики и информационных технологий.

Ушакова Наталья Николаевна — доцент кафедры информационных систем и технологий факультета информационных систем и защиты информации, кандидат технических наук, e-mail: natush2006@yandex.ru.

В данной работе предлагается и обсуждается метод синтеза цифрового изображения с повышенным разрешением, включающий расфокусировку изображения на стадии съемки и субпиксельную обработку на стадии синтеза изображения из серии снимков.

ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ

Принцип повышения разрешающей способности цифрового изображения предлагаемым способом продемонстрируем на одномерной модели (рис. 1).

Пусть оптической системой телескопа в плоскости, близкой к фокальной, формируется резкое оптическое изображение удаленного объекта. Разместим непрозрачный для оптических лучей экран **a** в плоскости максимальной фокусировки изображения, в нашем случае практически совпадающей с задней фокальной плоскостью телескопа. Экран снабдим системой периодически расположенных диафрагм, пропускающих свет и формирующих расфокусированное изображение на линейке детекторов того же размера (диафрагмы можно представлять, например, в виде щелей, расположенных перпендикулярно плоскости рисунка). Экран с диафрагмами будем называть маской. Маска может смещаться вдоль направления, определяемого пересечением фокальной плоскости и плоскости рисунка, на расстояние равное ширине диафрагмы. На рис. 1 показаны соответствующие положения линейки детекторов относительно маски: **b1** и **b2**.

Сигналы детекторов в каждом из двух положении маски представляют расфокусированное изображение фрагментов, вырезаемых диафрагмами из изображения в фокальной плоскости. Расстояние между фокальной плоскостью и плоскостью линейки детекторов выбираем таким, чтобы расфокусированные изображения соседних фрагментов не пересекались.

В таком случае сигналы двух детекторов, фиксирующих расфокусированное изображение выделенного фрагмента, могут быть однозначно связаны с сигналами виртуальных детекторов, поперечные размеры которых в два раза меньше чем у реальных детекторов, расположенных на месте соответствующей диафрагмы.

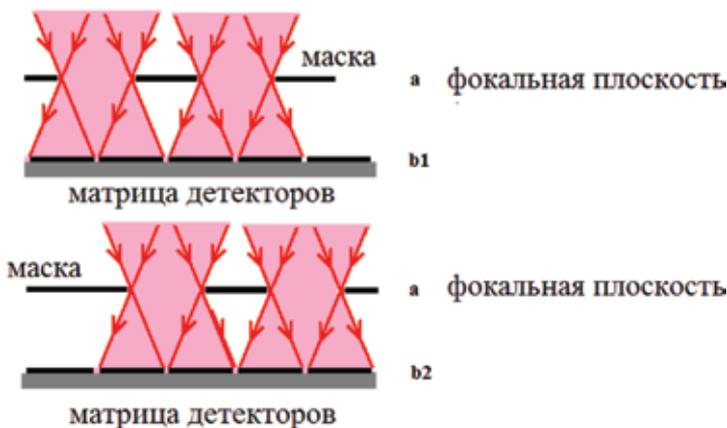


Рис. 1. Одномерная модель системы формирования двух цифровых изображений удаленного объекта линейкой детекторов: **a** — маска с диафрагмами; **b1** и **b2** — два различных положения линейки детекторов относительно маски с диафрагмами

Если сигналы реальных детекторов для двух положений маски обозначить соответственно $b1_i$ и $b2_i$, а виртуальных a_i , то для случая, представленного на рис. 1, эта связь в матричной форме будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} a1_{4i} \\ a1_{4i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b1_{2i} \\ b2_{2i+1} \end{pmatrix}, \quad (1a)$$

$$\begin{pmatrix} a2_{4i+2} \\ a2_{4i+3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b2_{2i+1} \\ b2_{2i+2} \end{pmatrix}, \quad (1б)$$

где векторы $b1$ и $b2$ представляют свертку соответствующего фрагмента изображения a на площади диафрагмы с функцией рассеяния точки, характеризующей процес расфокусировки.

Рисунок 2 демонстрирует результат синтеза одномерного изображения с увеличенным вдвое разрешением на базе двух изображений, снятых детекторами, расположенными за маской с диафрагмами. Для непрерывной функции, представляющей одномерное оптическое изображение, мы смоделировали вектор

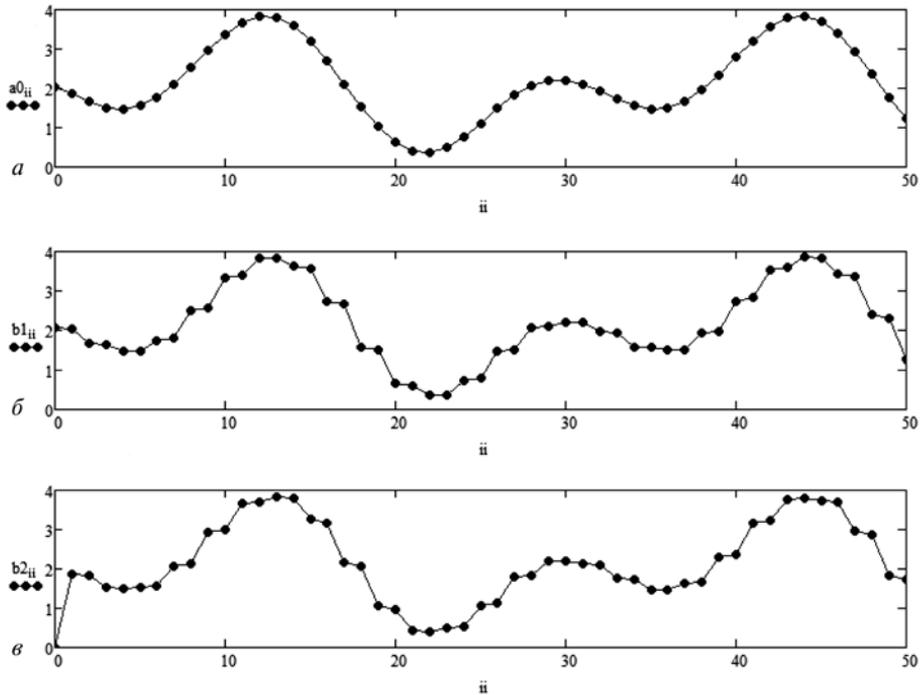


Рис. 2. Одномерное цифровое изображение, снятое линейкой детекторов в фокальной плоскости телескопа: a — резкое изображение; b — за маской с диафрагмами в положении 1; v — в положении 2 вне фокусной плоскости (расфокусированные изображения)

сигналов a_0 линейки детекторов заданного поперечного размера для случая, если бы они располагались в фокальной плоскости телескопа (рис. 2а), а также сигналы детекторов, расположенных за маской с диафрагмами для двух различных положений линейки (рис. 2б, в). Согласно формулам (1а) и (1б) из полученных сигналов было синтезировано одномерное изображение $aa = a_1 + a_2$ (сигналы виртуальных детекторов) (рис. 3).

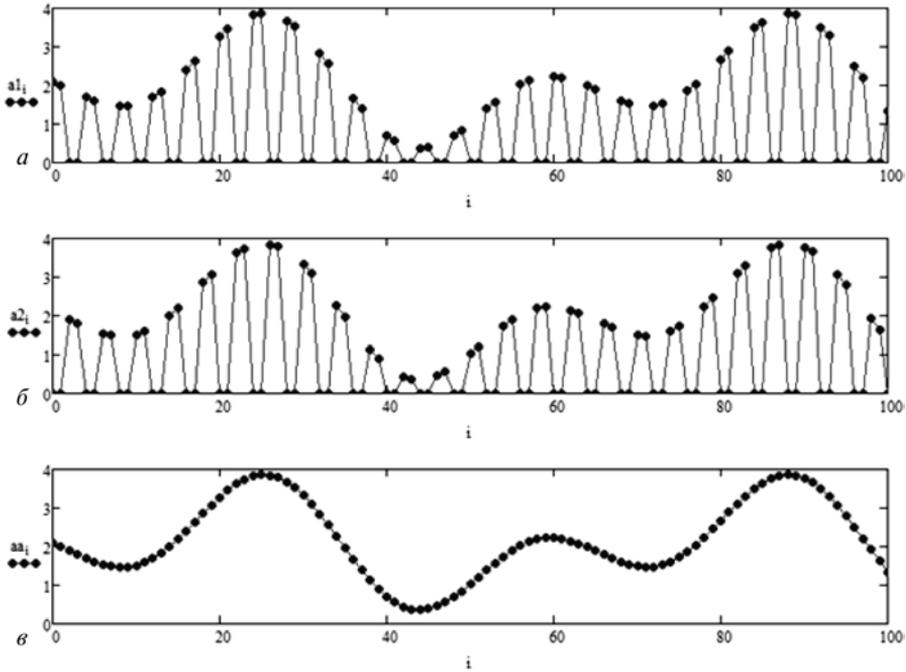


Рис. 3. Синтезированное изображение, снятое виртуальными детекторами, расположенными на маске вместо диафрагм в положении 1 (а), в положении 2 (б) и суммарное изображение (в)

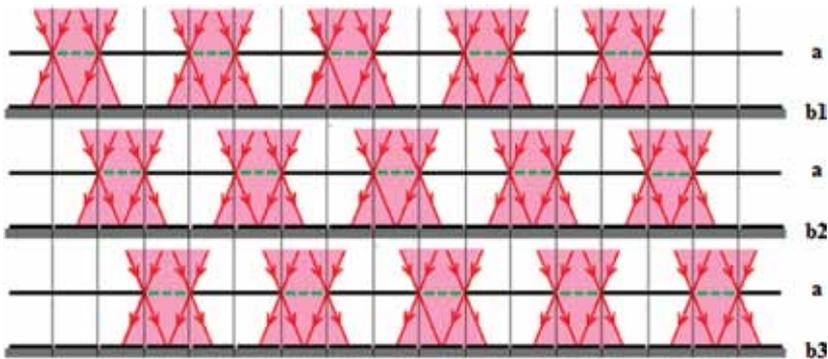


Рис. 4. Схема трехкратного повышения разрешения цифрового одномерного изображения: а — маска с диафрагмами, b1, b2, b3 — линейка детекторов при различных положениях экрана

Сравнивая синтезированное изображение **аа**, с изображением **а0** можно видеть, что синтезированное изображение действительно имеет разрешающую способность субпиксельного уровня (равную половине пиксела). Приведенная схема может быть модифицирована с целью получения более высокого коэффициента увеличения разрешающей способности синтезируемого изображения.

Например, на рис. 4. представлена схема, обеспечивающая увеличения разрешающей способности изображения до уровня одной трети пиксела. Для этого линейку детекторов необходимо расположить за экраном на таком расстоянии, чтобы расфокусированный фрагмент изображения охватывал бы не два, а три пиксела.

ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ

Если вместо линейки использовать матрицу детекторов (например, ПЗС-матрицу), то предлагаемым способом можно синтезировать двумерное цифровое изображение объектов с линейным разрешением $1/n$ пиксела на основе серии снимков, получаемых с помощью ПЗС-матрицы за маской, имеющей решетку диафрагм с поперечными размерами равными размеру одного пиксела (детектора), расположенных на экране со сдвигом друг относительно друга на n пикселов, где n -коэффициент кратность увеличения линейного разрешения синтезируемого снимка. Для синтеза изображения по такой схеме необходимо и достаточно иметь n^2 изображений (экспозиций) при различных положениях экрана относительно матрицы детекторов, реализуемых при сдвиге экрана в двух взаимно-перпендикулярных направлениях на величины кратные линейному размеру пиксела (0, 1, ..., n). Каждый из получаемых цифровых изображений будет содержать непересекающиеся расфокусированные изображения фрагментов, сформированных за диафрагмами маски. Вся совокупность из n^2 снимков полностью описывает изображение, формируемое оптической системой телескопа в фокальной плоскости (в плоскости маски).

В частности в случае $n = 3$, связь между девятью пикселями каждого расфокусированного фрагмента изображения и девятью малыми виртуальными пикселями в апертуре диафрагмы может быть выражена в виде свертки виртуального

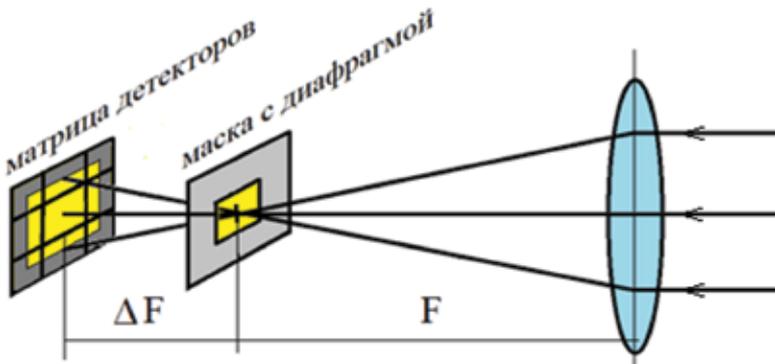


Рис. 5. Фрагмент маски с диафрагмами и соответствующего участка матрицы детекторов. F — фокусное расстояние оптической системы телескопа, ΔF — смещение детектирующей матрицы относительно фокуса

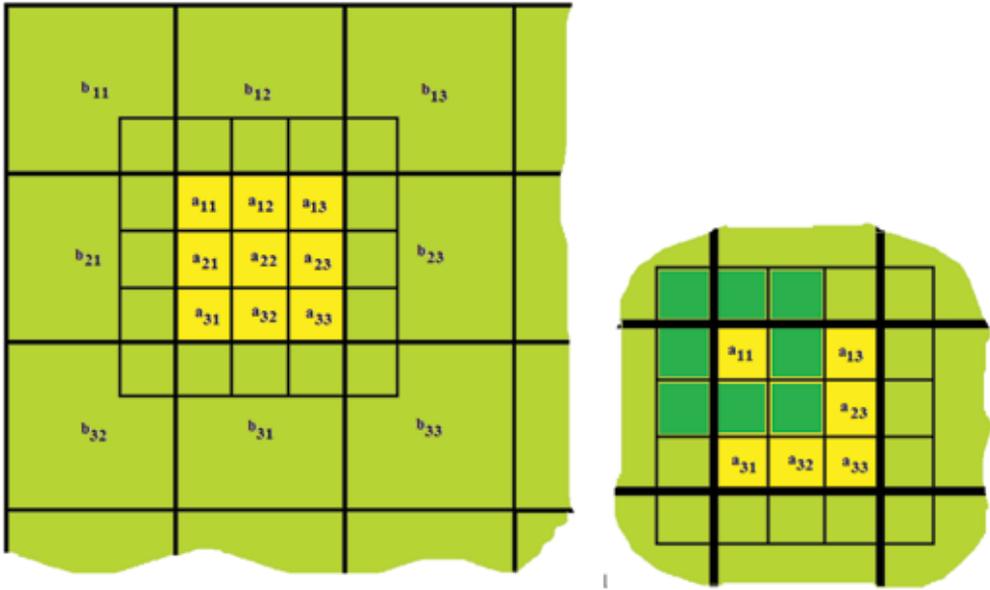


Рис. 6. Расфокусировка изображения диафрагмы на больших пикселах (*a*); расфокусированное изображение одного малого пиксела за диафрагмой (*b*)

изображения *a* с аппаратной функцией *h*, описывающей в малых пикселах апертуру диафрагмы

$$b(x, y) = \iint a(x, y) h(x - s, y - k) ds dk . \quad (2)$$

Эта связь однозначна и одинакова для всех фрагментов изображения, соответствующих решетке диафрагм на экране маски. Взаимная независимость фрагментов обуславливает помехоустойчивость алгоритма синтеза полного изображения.

На рис. 6*a* представлена схема расположения матрицы детекторов *b* (зеленый цвет) относительно диафрагмы и виртуальной матрицы детекторов внутри диафрагмы (желтый цвет). Диафрагма располагается над матрицей на таком расстоянии от нее, что для заданной апертуры оптической системы телескопа расфокусированное изображение виртуального пиксела будет представлять квадрат с размерами три на три малых пиксела (для квадратной апертуры телескопа), представленный на рис. 6*b* для пиксела *a*_{1,1} темнозеленым цветом.

Таким образом, сигналы детекторов в виде больших пикселов, представляющие расфокусированный фрагмент изображения, могут быть связаны с сигналами виртуальных детекторов, дающих в виде малых пикселов резкое изображение того же фрагмента, расположенное на площади диафрагмы, некоторой линейной системой уравнений. Матрицы *a* и *b* могут быть записаны построчно в виде векторов. При этом матрица, связывающая эти векторы, может быть легко определена для конкретного расположения маски и матрицы детекторов. Вычислив матрицу обратную ей, можно записать формулу для определения «вектора» сигналов *a* виртуальных детекторов. Для приведенного примера формула имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ a_{31} \\ a_{32} \\ a_{33} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} \frac{1}{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{9} & \frac{1}{3} & \frac{2}{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{9} & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 & \frac{2}{9} & 0 & 0 \\ \frac{4}{9} & \frac{2}{3} & \frac{4}{9} & \frac{2}{3} & 1 & \frac{2}{3} & \frac{4}{9} & \frac{2}{3} & \frac{4}{9} \\ 0 & 0 & \frac{2}{9} & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 & \frac{2}{9} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{9} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2}{9} & \frac{1}{3} & \frac{2}{9} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{9} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{12} \\ b_{13} \\ b_{21} \\ b_{22} \\ b_{23} \\ b_{31} \\ b_{32} \\ b_{33} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА НА РЕАЛЬНОМ ЦИФРОВОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Для демонстрации метода построим модель с использованием реального цифрового изображения (рис. 7а). Представим это изображение пикселями достаточно большого размера (рис. 7б), чтобы нагляднее продемонстрировать увеличение разрешения синтезируемого изображения. С помощью маски в виде экрана с диафрагмами размером в один пиксел выделяем фрагменты исходного цифрового изображения и генерируем сигналы в виде больших пикселей для моделирования расфокусированного изображения выделенных фрагментов. Смещая



Рис. 7. Исходное изображение (а); модельное изображение, представленное крупными пикселями (б)

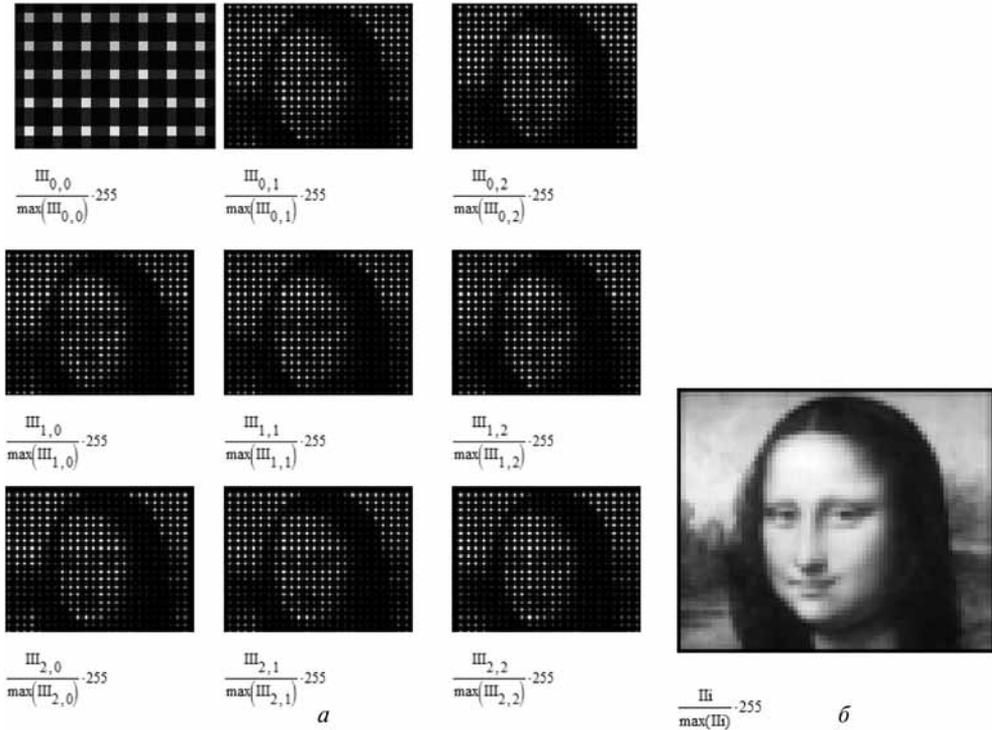


Рис. 8. Девять изображений, полученных при различных положениях маски с диафрагма-ми (а); синтезированное изображение разрешением в 1/3 пиксела (б)

маску на один пиксел по горизонтали или вертикали, получим полный набор из девяти изображений $\Pi_{0,0}, \Pi_{0,1}, \dots, \Pi_{3,3}$, представленных на рис. 8а. Сумма этих фрагментов в больших пикселах составит полное расфокусированное изображение (рис. 8б). Применяя к этой системе изображения, получаемые в реальности за маской с диафрагмами, формулу для синтеза изображения субпиксельного разрешения, мы получим соответственно девять изображений (рис. 9а), сумма которых и дает результирующее синтезированное изображение (рис. 9б), имеющее для рассмотренного примера в три раза более высокое линейное разрешение, а именно, равное 1/3 пиксела.

Увеличенное синтезированное изображение одного из фрагментов демонстрирует внутреннюю структуру на площади диафрагм (внутри большого пиксела).

Для демонстрации эффекта увеличения разрешения в синтезированном изображении на рис. 10 представлены изображения в реальных пикселах и в синтезированных.

СКАНИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Съемка поверхности Земли со спутников ведется в большинстве случаев методом сканирования линейкой детекторов. Для получения цифровых изображений субпиксельного уровня предлагаемым способом достаточно линейки, состоящей

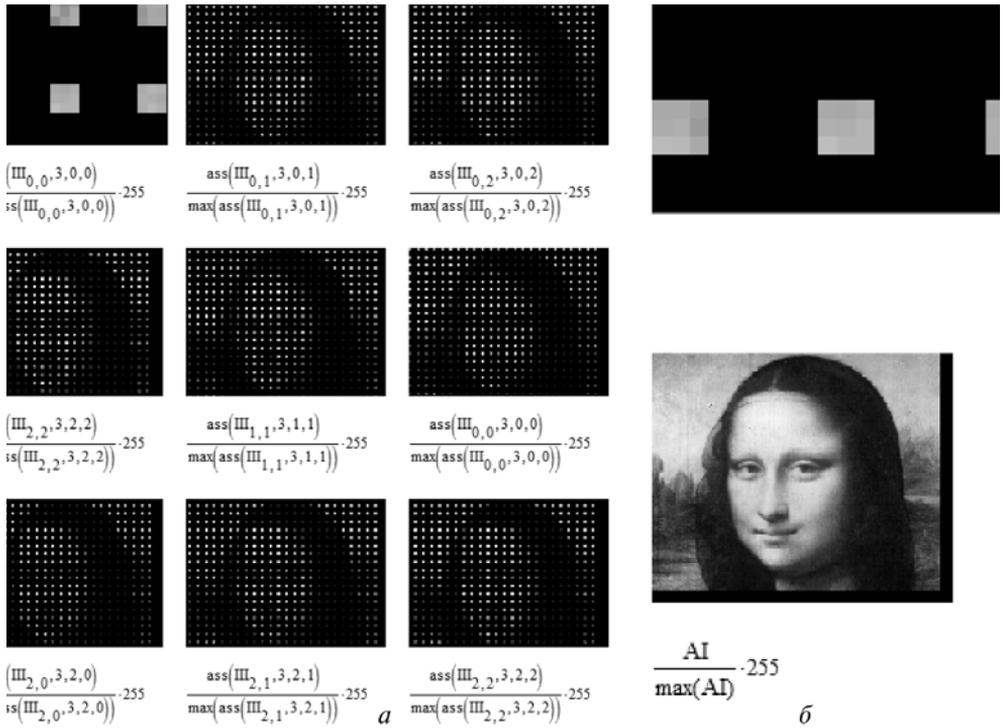


Рис. 9. Девять синтезированных изображений в плоскости маски (а); суммарное синтезированное изображение (б)



Рис. 10. Изображение в целых пикселах, заданных размером детектора (а); синтезированное изображение в пикселах размера $1/3 \times 1/3$ пиксела (б)

из нескольких рядов детекторов. Например, если выбрано увеличение линейного разрешения до $1/3$ пиксела, то схема сканирования может иметь вид, представленный на рис. 11. Здесь желтым цветом выделены пикселы (детекторы), над которыми будут располагаться диафрагмы маски. Остальные пикселы будут закрыты экраном маски. Сканирование выполняется в направлении указанном стрелками тремя трехслойными линейками детекторов с маской.

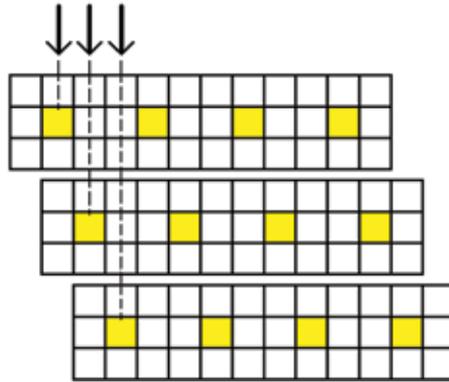


Рис. 11. Система сканирования, состоящая из трех матриц с масками, сдвинутых на 1 пиксел друг относительно друга. Стрелками указано направление сканирования

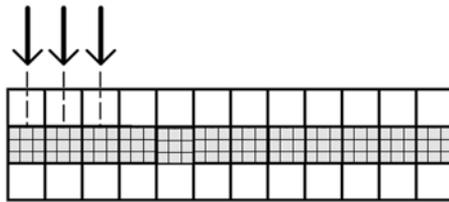


Рис. 12. Эффективная (суммарная) сканирующая линейка, для ДЗЗ с разрешением 1/3 пиксела

Сканирование тремя линейками обеспечивает регистрацию и синтез полной картины с разрешением 1/3 пиксела. Эффективная сканирующая линейка виртуальных (синтезированных) 3×3 малых пикселей в каждой диафрагме представлена на рис. 12.

Литература

[Блажевич и др., 2010] *Блажевич С. В., Винтаев В. Н., Ушакова Н. Н.* Синтез космического изображения с улучшенной разрешающей способностью на основе субпиксельного сканирования // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 9–13.

SYNTHESIS OF THE DIGITAL IMAGES OF SUBPIXEL RESOLUTION LEVEL WITH THE USE OF PRE-DEFOCUSING

S. V. Blazhevich¹, V. N. Vintaev², E. S. Selyutina¹, N. N. Ushakova²

¹ National Research Belgorod State University (NIU BSU)

² Belgorod University of Consumer Cooperatives, Economics and Law

A method of digital image resolution increase up to sub-pixel level is proposed including defocusing in stage of the survey and subpixel interpolation on the stage

of the image synthesis on basis of a range of the defocusing object images taken through a special mask situated in the plane of maximal image focusing of an optical system and available an array of diafrags, distributed with relative shifts on certain interger number of pixels (elements of the recording detector matrix). The problem of the use of the defocusing for resolution increase of satellite taking pictures of Earth surface realizing by means of scanning is discussed.

Keywords: image processing, rise in resolving ability, image synthesis, sub-pixel resolution.

Blazhevich Sergey Vladimirovich — head of a chair, doctor of science, e-mail: blazh@bsu.edu.ru.

Vintaev Viktor Nikolaevich — associate professor, PhD, e-mail: viktor.vn2010@yandex.ru.

Selyutina Yevgeniya Sergeyeвна — graduate student, e-mail: esselyutina@yandex.ru.

Ushakova Natalya Nikolaevna — associate professor, PhD, e-mail: natush2006@yandex.ru.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ И НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СПУТНИКА И УЛУЧШЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Е. И. Сомов, С. А. Бутырин

*НИИ Проблем надежности механических систем Самарского государственного
технического университета*

Представляются методики комплексирования навигационной и наблюдательной информации при ее апостериорной обработке для верификации работы системы управления спутника и улучшения измерительных свойств космических снимков.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-08-01037) и отделения ЭММПУ РАН (программа фундаментальных исследований № 15).

Ключевые слова: БИНС, космические изображения, измерительные свойства снимков.

Введение

Кратко рассматриваются задачи комплексирования навигационной и наблюдательной информации, полученной с борта космического аппарата (КА) землеобзора, в целях полетной верификации работы его системы управления (СУ) и улучшения измерительных свойств космических снимков без использования реперов. Предполагается, что на корпусе КА жестко закреплен телескоп с оптико-электронными преобразователями (ОЭП) — с двумя-тремя линейками ПЗС в его фокальной плоскости (ФП). Навигационная информация о движении центра масс КА получается с использованием систем GPS/GLONASS, а об угловом движении КА — с помощью бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС). Наблюдательная информация представлена космическими снимками одной и той же местности, полученными с различных ОЭП. Верификация работы СУ выполняется путем сопоставления наблюдательной и навигационной фактической информации с последующей оценкой показателей качества СУ и определением точностных характеристик измерительных приборов, установленных на борту КА. Комплексирование наблюдательной и навигационной информации также позволяет уточнить фактическое угловое движение телескопа относительно инерциального базиса в процессе оптико-электронной съемки, что даёт возможность улучшить измерительные свойства космических снимков.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В типовой схеме съемочной системы сканирующего типа применяется набор ОЭП, расположенных в ФП телескопа, с небольшим взаимным перекрытием

Сомов Евгений Иванович — начальник отдела наведения, навигации и управления движением, старший научный сотрудник, доцент, кандидат технических наук, e-mail: e_somov@mail.ru.

Бутырин Сергей Анфимович — начальник лаборатории моделирования систем управления, старший научный сотрудник, кандидат технических наук, e-mail: butyrinsa@mail.ru.

в продольном направлении и со сдвигом друг относительно друга в поперечном направлении. Такая конфигурация набора ОЭП и законы сканирующей космической съемки приводят к тому, что каждая строка изображения характеризуется своими параметрами. Поэтому формировать единое изображение из отдельных строк можно только на основе точной информации о расположении ОЭП в ФП и кинематических параметрах движения телескопа. При наличии достаточного числа реперов в получаемых изображениях можно использовать модификации общеизвестных методов координатной привязки видеоинформации [Собчук, 1978]. Для важных приложений актуальна геодезическая привязка космических изображений при отсутствии реперов.

ОБРАБОТКА НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Предполагается, что на основе разработанных ранее авторами методов, выполнена геометрическая калибровка (юстировка) взаимного углового положения систем координат телескопа и астрономической системы (АС) по звездному полю и/или по наземным полигонам с опорными точками (реперами) [Сомов, Бутырин, 2008; Somov, Butyrin, 2009]. При этом в БИНС используются алгоритмы многократной дискретной фильтрации, юстировки и калибровки с полетной идентификацией и компенсацией дрейфа измерителей вектора угловой скорости КА в составе БИНС [Сомов, Бутырин, 2009, 2010].

Разработана технология обработки навигационной информации для высокоточной координатной привязки космических снимков [Сомов, Бутырин, 2009]. При высоте полета КА ~600 км погрешности привязки координат космических снимков в плане были оценены значениями ~3 м. Таким образом, на тестовых задачах с реализуемыми характеристиками навигационных систем и БИНС получена высокая точность привязки космических снимков к наземным объектам без опорных точек на основе теории космических снимков [Бугаевский, Портнов, 1984] и картографии [Бугаевский, 1998]. Здесь, однако, требуются полетная калибровка и юстировка БИНС с прецизионной АС на основе звездных датчиков, что приводит к большим финансовым затратам.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ УГЛОВАЯ НАВИГАЦИЯ ТЕЛЕСКОПА

Предполагается, что частота информационного обмена ОЭП постоянна, а характеристики оптического тракта телескопа, включая геометрию его ФП, точно известны. Угловое движение КА на маршруте съемки представляется кватернионом $\Lambda(t) = \Lambda_p(t) \circ \delta\Lambda(t)$ в функции времени $t \in [t_0, t_f]$, где $\Lambda_p(t)$ и $\delta\Lambda(t)$ — кватернионы программного углового движения КА и фактического отклонения от него. На левой части рисунка представлены схема съемки и системы координат (СК): $O_s x_s y_s z_s$ — связанная с телескопом СК S с началом в центре проектирования S, причем телескоп имеет эквивалентное фокусное расстояние f_c ; $O_f x_f y_f z_f$ — СК F, связанная с ФП телескопа; $O_c x_c y_c z_c$ — СК C, связанная со снимком. Предварительно снимок с первого ОЭП в паре (например ОЭП1 на рисунке) разбивается на участки (псевдокадры) с заданным числом строк N. Для такого псевдокадра съемка считается приведенной к моменту времени t_c съемки его центральной строки.

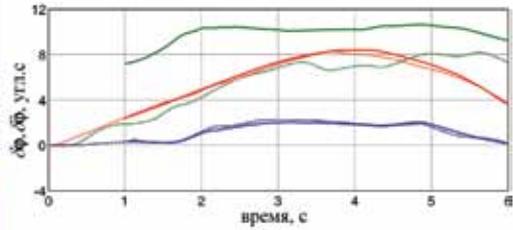
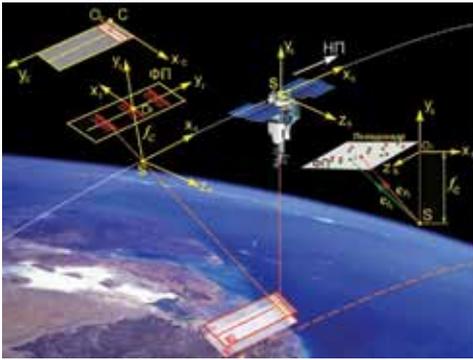


Схема съемки и результаты моделирования

На снимке с ОЭП1 в пределах очередного псевдокадра в момент времени $t_i^{(1)}$ (верхний индекс — номер ОЭП) выделяются N_o объектов и определяются их центры $x_i^{(1)}, y_i^{(1)}, i=1:N_o$. Далее выполняется перепроектирование объектов снимка на поверхность общеземного эллипсоида и определяются точки с геодезическими координатами L_i, B_i, H_i , которые принимаются за условные реперы. Затем, с использованием моделей программного движения КА на маршруте съемки (см. зоны покрытия М1 и М2 для соответствующих ОЭП на рисунке), формируется модель прогнозного снимка условных реперов в пределах псевдокадра для второго ОЭП в паре. При этом вычисляются моменты времени $t_{pi}^{(2)}$, соответствующие пересечениям строки ОЭП2 с точками изображения условных реперов и координаты этих точек на ОЭП2. В итоге получается набор прогнозных координат $x_{pi}^{(2)}, y_{pi}^{(2)}$ центров объектов псевдокадра ОЭП2. Далее выполняются компьютерное распознавание одноименных с ОЭП1 объектов на снимке ОЭП2, расчет прогнозных e_{pi} и фактических e_{fi} ортов, направленных из центра проектирования S на N_o объектов псевдокадра, см. рисунок. Кватернион $\delta\Lambda(t_c^{(2)})$ отклонения телескопа относительно его программного углового положения вычисляется с помощью модифицированного алгоритма QUEST [Сомов, Бутырин, 2008, 2009; Somov, Butyrin, 2009].

На правой части рисунка представлены результаты компьютерного эксперимента для параметров КА типа «Ресурс-ДК1» на известной орбите [Бутырин, Сомов, 2010; Сомов, Бутырин, 2011]. Здесь число строк псевдокадра равно 500, длительность маршрута составляет 6 с, интервал времени между наблюдениями одного и того же наземного объекта парой ОЭП1 и ОЭП2 равен 1 с, начальная ориентация КА относительно орбитальной СК задана только углом крена 20° . Модельные отклонения фактического углового движения телескопа от его программного движения соответствуют реальным характеристикам СУ спутника. Здесь пунктиром показаны учтенные в модели компоненты вектора углового отклонения $\delta\phi = 2\text{vect}(\delta\Lambda) = \{\delta\phi_x, \delta\phi_y, \delta\phi_z\}$ от программного движения, а сплошными линиями — восстановленные по предлагаемой методике угловые отклонения (синяя, зеленая и красная линии для $\delta\hat{\phi}_x, \delta\hat{\phi}_y$ и $\delta\hat{\phi}_z$ соответственно). Средняя ошибка определения углов $\delta\phi_x, \delta\phi_z$ равна $0''{,}2$, а угла $\delta\phi_y$ — $4''{,}5$.

Исследовано влияние на точность метода многих факторов, в том числе: количества условных реперов в псевдокадре, погрешностей определения координат их центров на снимках; неточность информации о фактическом расположении ОЭП в ФП; ошибки наведения и ракурса при отклонении движения КА от программного и др. Показано, что последний фактор является определяющим. Для примера с результатами на рисунке, при требуемой точности определения положения оптической оси телескопа $\delta\varphi_x, \delta\varphi_z \leq 0''{,}2$ ошибка определения начальной ориентации не должна превышать 1 угл. мин. Практическое применение метода требует знания фактического расположения матриц ОЭП в ФП с погрешностью не более 1 пиксела, что возможно с помощью полетных калибровок телескопа.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ И НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Информация об относительном угловом положении телескопа на основе получаемых изображений объединяется с навигационными данными естественным образом — по начальным условиям маршрута оптико-электронной съемки, которые вычисляются по измерениям БИНС в инерциальном базисе, с контролем по картам наблюдаемой местности.

Заключение

Представлены разработанные методики комплексирования навигационной и наблюдательной информации для геодезической привязки космических снимков, верификации работы системы управления спутника при сканирующей оптико-электронной съемке и улучшения измерительных свойств получаемых космических снимков. Эффективность предлагаемых методик и алгоритмов подтверждена результатами численного решения тестовых задач с учетом информации о типовых погрешностях движения КА.

Литература

- [Бугаевский, Портнов, 1984] *Бугаевский Л. М., Портнов А. М.* Теория одиночных космических снимков. М.: Недра, 1984.
- [Бугаевский, 1998] *Бугаевский Л. М.* Математическая картография. М.: Златоуст, 1998.
- [Бутырин, Сомов, 2010] *Бутырин С. А., Сомов Е. И.* Технология комплексирования навигационной и наблюдательной информации для высокоточной привязки космических снимков // Реф. докл. 27-й Конф. памяти выдающегося конструктора гироскопич. приборов Н. Н. Острякова. СПб.: Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2010. С. 37.
- [Собчук, 1978] *Собчук В. Г.* Координатная привязка видеоинформации по опорным точкам // Аэрокосм. исслед. Земли. Обработка видеоинформации на ЭВМ. М.: Наука, 1978. С. 71–78.
- [Сомов, Бутырин, 2008] *Сомов Е. И., Бутырин С. А.* Уточнение ориентации космического телескопа на основе апостериорной бортовой обработки измерительной информации // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2008. Т. 10. № 3. С. 790–798.
- [Сомов, Бутырин, 2009] *Сомов Е. И., Бутырин С. А.* Технология обработки сопровождающей измерительной информации для высокоточной координатной привязки космических снимков // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2009. Т. 11. № 5. С. 156–163.

- [Сомов, Бутырин, 2010] *Сомов Е. И., Бутырин С. А.* Цифровая обработка сигналов, калибровка и юстировка бесплатформенной инерциальной системы для определения ориентации маневрирующего космического аппарата // Сб. материалов 17-й Санкт-Петербургской междунаро. конф. по интегрированным навигац. системам. СПб.: Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2010. С. 75–77.
- [Сомов, Бутырин, 2011] *Сомов Е. И., Бутырин С. А.* Геодезическая привязка космических изображений на основе комплексирования навигационной и наблюдательной информации. // Сб. материалов 17-й Санкт-Петербургской междунаро. конф. по интегрированным навигац. системам. СПб.: Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2011. С. 264–266.
- [Somov, Butyrin, 2009] *Somov Ye. I., Butyrin S. A.* Onboard alignment identification of a space telescope and a star tracker cluster [Электронный текст] // Proc. 4th Intern. Scientific Conf. on Physics and Control. Catania, Univ. Catania. 2009. P. 1–6. Режим доступа: <http://lib.physcon.ru/?item=1943>.

**INTEGRATING THE NAVIGATING AND OBSERVING INFORMATION
FOR VERIFICATION OF THE SPACECRAFT CONTROL SYSTEM
WORK AND IMPROVING THE MEASUREMENT PROPERTIES
OF THE SPACE PICTURES**

Ye. I. Somov, S. A. Butyrin

*Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability, Samara State
Technical University*

The techniques for integrating the navigating and observing information at its a posterior processing for verification of the spacecraft control system work and improving the measurement properties of the space pictures, are presented.

Keywords: SINS, space images, measurement properties of the space pictures.

Somov Yevgeny Ivanovich — head of department guidance, navigation and motion control, PhD, assistant professor, e-mail: e_somov@mail.ru.

Butyrin Sergey Anfimovich — head of laboratory modeling of control systems, PhD, assistant professor, e-mail: butyrinsa@mail.ru.

МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ

А. Ю. Рубис, О. В. Выголов, Ю. В. Визильтер

ФГУП «ГосНИИ Авиационных систем» (ФГУП «ГосНИИАС»), Москва

Для комплексирования изображений, полученных в различных спектральных диапазонах (ТВ — видимый диапазон, ИК1 — 3...5 мкм, ИК2 — 8...14 мкм) разработан алгоритм на основе морфологического подхода Пытьева и гистограммной морфологической сегментации методом динамического программирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-08-01114-а).

Ключевые слова: комплексирование, морфология, сегментация, динамическое программирование, система улучшенного видения.

Введение

Часто в сложных метеорологических условиях экипажу летательного аппарата на этапах захода на посадку, посадки и рулежки по взлетно-посадочной полосе требуется повышенное информационное обеспечение внешней обстановки. С этой целью разрабатываются авиационные системы «улучшенного видения» (СУВ), которые представляют экипажу комбинированный массив данных с датчиков различных спектральных диапазонов. Обработка и комплексирование многоспектральных данных — одна из задач СУВ.

Комплексирование снимков, полученных в различных спектральных диапазонах, заключается в получении нового изображения, которое содержит объекты и детали, видимые только на одном из исходных снимков и ненаблюдаемые на других. Алгоритмы комплексирования, основанные на получении правила, по которому из пикселей исходного изображения непосредственно формируется пиксель результирующего изображения (комплексирование на основе добавления отличий, оценки информативности и др.), получили наибольшее распространение, однако они не всегда дают приемлемое качество результирующего изображения. По сравнению с этими методами предложенный алгоритм, основанный на морфологическом подходе Пытьева и гистограммной морфологической сегментации методом динамического программирования, показал достаточно высокое качество комплексирования изображений.

1. АЛГОРИТМ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ

Исходные данные для комплексирования представлены в виде трех полутоновых изображений различных спектральных диапазонов (ТВ — видимый диапазон, ИК1 — 3...5 мкм, ИК2 — 8...14 мкм) с заранее проведенной геометрической привязкой изображений и одинакового размера.

Рубис Алексей Юрьевич — инженер, e-mail: arcelt@mail.ru.

Выголов Олег Вячеславович — начальник сектора, кандидат технических наук, e-mail: o.vygodov@gosniias.ru.

Визильтер Юрий Валентинович — начальник лаборатории компьютерного машинного зрения, старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук, e-mail: viz@gosniias.ru.

Алгоритм состоит из следующих основных этапов:

- получение морфологической формы на основе критериальной гистограммной сегментации с заданным количеством мод гистограммы;
- расчет морфологических проекций;
- комбинирование изображений.

1.1. Получение устойчивой формы путем критериальной гистограммной сегментации

Методы морфологического анализа Пытьева основаны на формализации понятия «форма изображения» и введении оператора «проецирования» изображения на форму другого изображения [Пытьев, 1983]. Предполагается, что геометрическая форма изображения определяется областями однородной яркости, и любое изображение той же сцены в других условиях может быть получено (смоделировано) путем изменения яркости этих областей. Таким образом, существует такой максимальный инвариант яркостных преобразований, который определяет все, что относится к данной сцене, и не зависит от условий формирования изображений. Его называют *формой изображения* сцены.

В предлагаемом алгоритме комплексирования в качестве основы для формирования меточного изображения формы используется гистограммная сегментация методами динамического программирования [Вильзитер и др., 2009].

В качестве базового на начальном этапе алгоритма выбирается изображение ИК1. Такой выбор обусловлен тем, что характерные черты объектов, плохо различимые в видимом диапазоне из-за внешних факторов (засветка, туман и пр.), сохраняются на изображениях в инфракрасных диапазонах. В данном случае изображение ИК1 обладает наибольшей визуальной информативностью по сравнению с ИК2 и ТВ изображениями.

Критериальное выделение мод гистограммы основывается на непосредственной оптимизации *глобального критерия разделимости* на $n > 1$ мод. Введем $(n + 1)$ -мерный вектор $\mathbf{t} = (t_0, \dots, t_n)$, где $t_0 = 0$, $t_n = 255$, t_1, \dots, t_{n-1} — свободные переменные, соответствующие порогам, разделяющим моды гистограммы. Тогда среднеквадратичный критерий оптимального выбора порогов сегментации будет иметь вид:

$$\sum_{i=0, \dots, n} DISP(t_i, t_{i+1}) \rightarrow \min(t_1, \dots, t_{n-1}).$$

Поскольку гистограмма — одномерный массив, эта задача однозначно решается методом динамического программирования. В результате определяется такой набор порогов сегментации, который обеспечивает минимальное среднеквадратичное отклонение сегментированного на n уровней изображения от исходного.

Если число мод гистограммы заранее неизвестно, то задача сегментации требует регуляризации. В качестве регуляризирующего функционала применяется критерий, одновременно штрафующий и суммарное среднеквадратичное отклонение сегментированного изображения от исходного, и число выделяемых мод:

$$\sum_{i=0, \dots, n} DISP(t_i, t_{i+1}) + \alpha n \rightarrow \min(n, t_1, \dots, t_{n-1}).$$

Получаемый оператор гистограммной сегментации изображения считается критериальным морфологическим проектором, поскольку метод динамического



Рис. 1. Пример критериальной гистограммной сегментации с заданным количеством мод n

программирования обеспечивает нахождение глобального оптимума критерия сегментации.

На рис. 1 приведен пример критериальной гистограммной сегментации для различных мод n .

1.2 Расчет морфологических проекций и комбинирование изображений

Морфологическая проекция на форму — кусочно-постоянное изображение. Расположение областей постоянной яркости проекции совпадает с расположением областей самой формы, яркость каждой из областей проекции рассчитывается как среднее значение пикселей исходного изображения, покрываемых данной областью.

После выделения связанных областей и дополнительной обработки проводится расчет морфологических проекций для изображения видимого диапазона (ТВ) и диапазона 8...14 мкм (ИК2). Для этого в каждом из них проводится суммирование яркостей пикселей, координаты которых принадлежат одной области меточного изображения ИК1'; рассчитывается их среднее значение; затем это значение присваивается аналогичной области на изображении проекции. Функции яркости кусочно-постоянных изображений проекций будут иметь вид:

$$f_{ИК1'}(x, y) = \sum_{i=1}^N c_i \chi_{A_i}(x, y),$$

$$P_{f_{ИК1'} f_{ИК2}}(x, y) = \sum_{i=1}^N c_{ИК2i}^* \chi_{A_i}(x, y), \quad x, y \in X$$

$$c_{ИК2i}^* = \frac{\sum_x \sum_y \chi_{A_i}(x, y) f_{ИК2}(x, y)}{\sum_x \sum_y \chi_{A_i}(x, y)} = \frac{(\chi_{A_i}, f_{ИК2})}{\|\chi_{A_i}\|^2}, \quad 0 < c_{ИК2i}^* < 2^m$$

$$0 < c_{ТВi}^* < 2^m, \quad 0 < c_i < \infty, \quad i = 1, \dots, N$$

$$P_{f_{ИК1'} f_{ТВ}}(x, y) = \sum_{i=1}^N c_{ТВi}^* \chi_{A_i}(x, y), \quad \chi_{A_i}(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in A_i, \\ 0, & (x, y) \notin A_i, \end{cases}$$

$$c_{ТВi}^* = \frac{\sum_x \sum_y \chi_{A_i}(x, y) f_{ТВ}(x, y)}{\sum_x \sum_y \chi_{A_i}(x, y)} = \frac{(\chi_{A_i}, f_{ТВ})}{\|\chi_{A_i}\|^2},$$

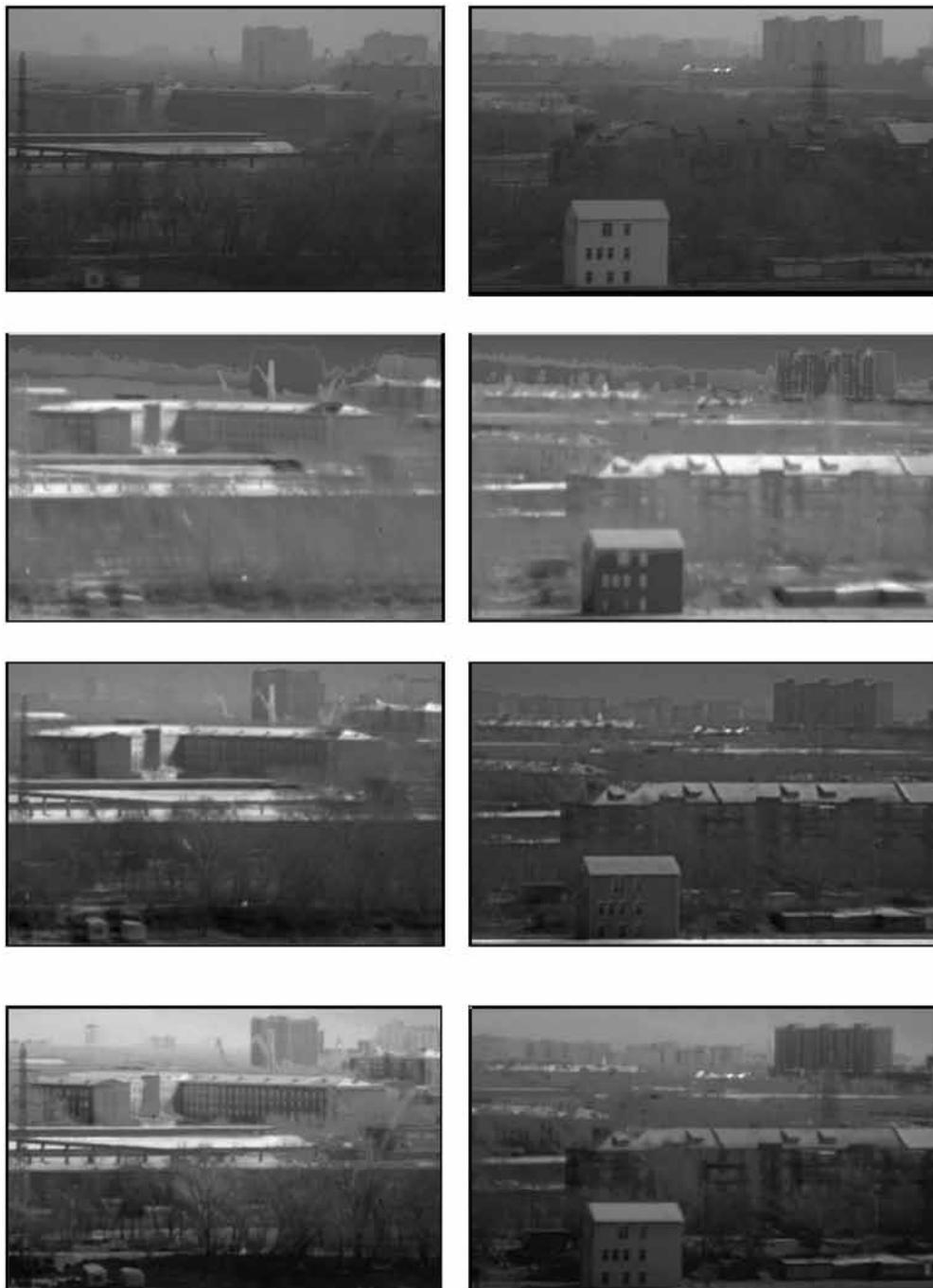


Рис. 2. Примеры многоспектральных изображений, полученных при помощи различных алгоритмов комплексирования

где $f_{ИК1'}(x, y)$, $P_{f_{ИК1'}f_{ИК2}}(x, y)$, $P_{f_{ИК1'}f_{ТВ}}(x, y)$ — функции яркости меточного изображения морфологической формы ИК1', проекций на морфологическую форму ИК2 и ТВ соответственно; $\chi_{A_i}(x, y)$ — функция принадлежности пикселя (x, y) к области постоянной яркости A_i ; m — количество бит на пиксель. На проекции происходит выделение определенных деталей формы и при этом используется яркостная информация проецируемого изображения (в данном случае ТВ).

Конечный этап алгоритма — комбинирование изображений. Для этого использовался наиболее быстрый и простой способ — усреднение изображений проекций и изображения видимого диапазона, поскольку изначально изображение видимого диапазона обладает большим по сравнению с другими диапазонами разрешением

$$f_K = \frac{1}{3}f_{ТВ} + \frac{1}{3}3P_{f_{ИК1'}f_{ИК2}} + \frac{1}{3}P_{f_{ИК1'}f_{ИК2}}.$$

2. ПРИМЕРЫ РАБОТЫ АЛГОРИТМА

На рис. 2 приведены примеры многоспектральных изображений, полученных при помощи различных алгоритмов комплексирования. Видно, что многоспектральное изображение, полученное при помощи морфологического комплексирования обладает большей реалистичностью по сравнению с изображениями, полученными при помощи других алгоритмов, а также содержит большее количество деталей (особенно, на заднем плане сцены), чем изображения в ТВ диапазоне.

Литература

- [Пытьев, 1983] *Пытьев Ю. П.* Морфологический анализ изображений // Докл. АН СССР. 1983. Т. 269. № 5. С. 1061–1064.
- [Визильтер и др., 2009] *Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Ларетина Н. А.* Проективные морфологии на базе операторов фильтрации и сегментации изображений, вычислимых методом динамического программирования // Вестн. компьютер. и информац. технологий. 2009. № 6.

MULTISPECTRAL MORPHOLOGICAL IMAGE FUSION

A. Yu. Rubis, O. V. Vigolov, Yu. V. Vizilter

State research institute of aviation systems (FGUP “GosNIIAS”), Moscow

Image fusion algorithm based on Pyt'ev's morphology methods and criteria segmentation of histogram using methods of dynamic programming is developed for merge multispectral data in few bandwidth (visible range, 3...5 um, 8...14 um).

Keywords: image fusion, morphology, segmentation, dynamic programming, enhanced vision system.

Rubis Aleksey Yur'evich — engineer, e-mail: arcelt@mail.ru.

Vigolov Oleg Vyacheslavovich — head of sector, candidate of sciences, e-mail: o.vygolov@gosniias.ru.

Vizilter Yuri Valentinovich — head of the laboratory of computer vision, doctor of sciences, senior researcher, e-mail: viz@gosniias.ru.

Секция 4

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

ПОИСК ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КРИВЫХ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

А. Е. Левашов, Д. В. Юрин

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
(МГУ), Москва*

Предлагается многоэтапная система поиска параметрических кривых на изображении. Сначала производится поиск граничных линий, затем, после ряда подготовительных процедур, результат сохраняется в виде цепочек связанных пикселей. Эти цепочки анализируются целиком и по частям. По-фрагментный анализ, фазы роста фрагмента и слияния фрагментов, постоянный контроль достоверности, в смысле χ^2 , позволяют находить параметрические кривые различных типов одновременно, а из набора моделей выбирать наиболее простую, описывающую кривую с точностью, соответствующей погрешности исходных данных.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. и РФФИ (проект № 09-07-92000-ННС_а).

Ключевые слова: детектор границ, параметрические кривые, векторизация.

Введение

Одна из ключевых задач в обработке изображений и компьютерном зрении — поиск на изображениях объектов, представляющих интерес. Зачастую целесообразно применять упрощенный подход, основанный на поиске известных ориентиров. В роли таких ориентиров могут выступать балки, люки, окна, купола, т. е. объекты, видимые в виде прямых, окружностей, эллипсов и других простых геометрических фигур.

В настоящей работе предлагается метод, анализирующий цепочки связанных пикселей — граничных линий, что становится возможным при использовании высококачественных детекторов граничных точек. Путем рандомизированных проверок отбрасываются граничные линии, заведомо не удовлетворяющие ни одной из рассматриваемых гипотез. Согласно оставшимся гипотезам оценка параметров выполняется методом наименьших квадратов, достоверность контролируется методом χ^2 .

АЛГОРИТМ

Схема алгоритма выглядит следующим образом:

- 1) детектор граничных линий [Pratt, 2007];
- 2) уточнение граничных линий [Zhang, Suen, 1984];
- 3) удаление точек ветвления;
- 4) векторизация изображения;

Левашов Алексей Евгеньевич — студент, e-mail: alexeylevashov89@gmail.com
Юрин Дмитрий Владимирович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: yurin_d@inbox.ru

- 5) анализ каждой граничной линии в отдельности;
- 6) объединение параметрических кривых с близкими значениями параметров.

На первом шаге применяется детектор граничных линий Канны — для изображений в оттенках серого, Дизензо — Кумани — для цветных изображений [Pratt, 2007]. Используется реализация этих алгоритмов с вычислением производных путем свертки с производными функции Гаусса и процедурой подавления не максимальных точек [Pratt, 2007]. Для гарантии того, что все граничные линии — единичной толщины и не содержат точек ветвления, выполняются шаги 2–3. Следующий этап — векторизация, т. е. граничные точки собираются в виде списка кривых, а кривые — в виде массива точек. Каждая точка представляется в памяти как пара координат, а также записывается направление и величина градиента в данной точке. Весь дальнейший анализ ведется только с такими массивами граничных точек.

Удаление точек ветвления

Удаление точек ветвления основано на той же морфологической операции, что и уточнение граничных линий, описываемой в [Zhang, Suen, 1984]. Поэтому в этом разделе используются обозначения из [Zhang, Suen, 1984]. Вокруг каждой граничной точки P_1 строится окно 3×3 пиксела и вычисляются характеристики $A(P_1)$ и $B(P_1)$. Точка удаляется вместе с ее окрестностью, если выполняется условие $B(P_1) \geq 5 \vee A(P_1) > 2$. В отличие от [Zhang, Suen, 1984], точки удаляются сразу при сканировании. Если в процессе сканирования хотя бы одна точка была удалена, следует потом просканировать еще раз. Мотивировка удаления точек ветвления границ двоякая: с одной стороны это сильно упрощает структуру данных и ее представление в памяти, а с другой — вблизи точек ветвления погрешность детекторов границ наиболее высока и неточность определения границ будет скорее затруднять правильную оценку параметров кривых.

Алгоритм анализа граничной линии

Так как одна граничная линия может состоять из нескольких параметрических кривых, то важной задачей является быстро и достоверно разбить данную линию на модели. Эту задачу выполняет *Алгоритм 1*:

P — массив точек данной граничной линии; \mathbf{M} — это заданный априори набор математических моделей параметрической кривой, на соответствие которым проверяются фрагменты кривой. Под конкретной параметрической кривой понимается $\{h, params\}$, где $params$ — это параметры кривой модели $h \in \mathbf{M}$. Для каждой такой модели h задаются следующие алгоритмы:

1) $LeastSquareMatching(h, n_1, n_2)$ — метод наименьших квадратов для точек из сегмента $P[n_1, \dots, n_2]$, который находит оптимальные параметры для h ;

2) $ChiSquareFitting(\{h, params\}, n_1, n_2)$ — критерий достоверности χ^2 модели h с параметрами $params$ для сегмента $P[n_1, \dots, n_2]$;

3) $B(h)$ — минимальное необходимое количество точек для построения модели h ;

4) $FindParams(P', h)$ — нахождение параметров модели h по минимально необходимому количеству $B(h)$ точек P' ;

5) $a \in m$ — способ определить лежит ли точка a на параметрической кривой $m = \{h, params\}$, $h \in \mathbf{M}$.

S — упорядоченный набор S_0, \dots, S_{n-1} разделителей, которые делят массив на сегменты. Разделитель это индекс элемента в массиве. Все найденные кривые будут записаны в M , где M — это множество троек $\{m, n_1, n_2\}$, где n_1, n_2 — индексы начала и конца сегмента.

<u>Алгоритм 1.</u> Separation():	<u>Алгоритм 2a.</u> ExpandLeft(m, n_1, n_2):
Разбиение P на сегменты, удовлетворяющие моделям.	Расширение сегмента слева.
1. $S \leftarrow [0, size(P) - 1]$	1. if $(n_2 - n_1) \leq 1$
2. $M \leftarrow \{\}$	2. then return n_2
3. while	3. $i \leftarrow \frac{n_1 + n_2}{2}$
$\exists i: (S_{i+1} - S_i > C_{\min} \wedge !\exists m: \{m, S_i, S_{i+1}\} \in M)$	4. while $i < n_2 - 1$ do
4. do for $i = 0, i < size(S) - 1$	5. if $P_i \in m$ then
5. $m \leftarrow \text{FindParamCurve}(S_i, S_{i+1})$	$T_r \leftarrow C_r$ случайных
6. if m найдена then	6. точек из $P[i, \dots, n_2]$
7. $n_1 \leftarrow \text{ExpandLeft}(m, S_{i-1}, S_i)$	7. if $\forall a \in T_r: a \in m$ then
8. $n_2 \leftarrow \text{ExpandRight}$	if $\forall a \in P[i, \dots, n_2]: a \in m$
(m, S_{i+1}, S_{i+2})	8. then
9. $S_i \leftarrow n_1$	9. $n_1 \leftarrow 2i - n_2$
10. $S_{i+1} \leftarrow n_2$	10. $n_2 \leftarrow i$
11. $M \leftarrow M \cup \{m, n_1, n_2\}$	11. goto 1
12. else	12. $i \leftarrow \frac{i + n_2}{2}$
13. $S \leftarrow [S_0, \dots, S_i, \frac{S_i + S_{i+1}}{2}, S_{i+1}, \dots, S_{n-1}]$	13. return n_2

В алгоритме 1 сначала рассматривается все точки P и пробуется с помощью алгоритма 3 найти параметрическую кривую, описывающую данный сегмент. Если такого сделать не удастся, то сегмент делится пополам и процедура повторяется для двух половинок. Как только был найден сегмент, для которого нашлась оптимальная кривая, то выполняются алгоритм 2a и алгоритм 2b ExpandRight полностью аналогичен алгоритму 2a, только производит расширение сегмента справа, в статье не описан) для определения точных границ сегмента для найденной кривой. Деление пополам продолжается до тех пор, пока сегмент не будет меньше C_{\min} — константы, определяющей минимальное количество точек в сегменте. В алгоритме 3 C_{χ^2} — степень достоверности крите-

рия χ^2 . В *алгоритме 4* C_q — количество тестов быстрой проверки и C_q^{accept} — минимальное необходимое количество пройденных тестов быстрой проверки.

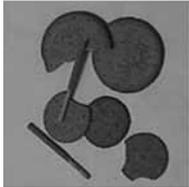
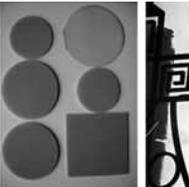
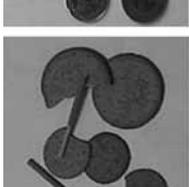
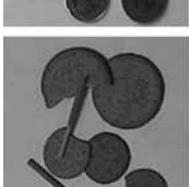
<i>Алгоритм 3.</i> FindParamCurve(n_1, n_2)	<i>Алгоритм 4.</i> QuickTest (h, n_1, n_2)
: Определение модели, описывающий сегмент $P[n_1, \dots, n_2]$: Быстрая проверка гипотезы h на сегменте $P[n_1, \dots, n_2]$
1. $m \leftarrow$ пустая модель	1. $count \leftarrow 0$
2. $T_{\chi^2} \leftarrow 0$	2. for $i = 0, i < C_q$ do
3. for each $h \in M$ do	3. $P' \leftarrow B(h)$ точек из $P[n_1, \dots, n_2]$, выбранных случайно
4. if QuickTest(h, n_1, n_2) then	4. $c \leftarrow$ случайно выбранная точка из $P[n_1, \dots, n_2]$
$params \leftarrow$ LeastSquareMatching (h, n_1, n_2)	5. $params \leftarrow$ FindParams(P', h)
$T_{\chi^2}' \leftarrow$ ChiSquareFitting ($\{h, params\}, n_1, n_2$)	6. if $c \in \{h, params\}$ then
7. if $T_{\chi^2}' > C_{\chi^2}$ then	7. $count \leftarrow count + 1$
8. if $T_{\chi^2}' > T_{\chi^2}$ then	8. return $count > C_q^{accept}$
9. $T_{\chi^2} \leftarrow T_{\chi^2}'$	
10. $m \leftarrow \{h, params\}$	
.	
11 return m	
.	

РЕЗУЛЬТАТЫ

Временные эксперименты были сделаны на процессоре Intel Core 2 Duo 2.00 GHz, оперативной памяти 2 Гб. Искались одновременно две модели: прямая и окружность. Времена работы алгоритма и его частей представлены в таблице в сравнении с алгоритмом [Chen, Chung, 2001]. Прочерком показаны тесты, которые алгоритм [Chen, Chung, 2001] не выполнил.

Пронумерованные колонки содержат времена работы: (1) детектор граничных линий; (2) утончение линий; (3) удаление узлов; (4) векторизация; (5) определение модели кривых и оценка параметров модели; (6) общее время исполнения предложенного алгоритма без детектора граничных линий; (7) количество окружностей найденных предложенным алгоритмом; (8) поиск окружностей [Chen, Chung, 2001]; (9) количество окружностей найденных алгоритмом [Chen, Chung, 2001].

Временные показатели

№ п/п	Размер изображения	Кол-во граничных точек	Кол-во граничных линий	Время работы, мс								Тестируемые изображения		
				1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	256×256	13 063	1511	11	4	3	6	8	21	5	54	3		
2	256×256	11 839	1473	11	3	3	5	7	18	7	55	4		
3	256×256	9167	1000	11	2	3	4	5	14	6	20	0		
4	256×192	7938	689	9	2	3	8	5	18	5	20	2		
5	375×486	27 881	2544	34	7	6	11	17	41	2	—	—		
6	559×559	39 076	3034	58	14	10	13	8	45	3	—	—		
7	1000×667	137 387	21 235	139	68	40	59	74	241	2	—	—		
8	1024×1024	228 526	30 932	372	106	88	85	128	407	0	—	—		

Заключение

Разработана система поиска параметрических кривых на изображениях. Сравнение с алгоритмом [Chen, Chung, 2001] показало близкие времена работы. Предложенный алгоритм находит все имеющиеся на изображении параметрические кривые указанных типов, в то время как алгоритм [Chen, Chung, 2001] пропускает часть кривых, тем большую, чем сложнее изображение. Таким образом, комбинация рандомизированных проверок с методом наименьших квадратов и критерием χ^2 обеспечивает высокое быстродействие без потери надежности. В отличие от преобразования Хафа, алгоритм не имеет ограничений на длины искомым кривых и может находить одновременно и короткие и длинные кривые.

Литература

- [Chen, Chung, 2001] *Chen T. C., Chung K. L.* An Efficient Randomized Algorithm or Detecting Circles // *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)* 2001. V. 83. P. 172–191.
- [Pratt, 2007] *Pratt W. K.* *Digital Image Processing: PIKS Scientific inside.* 4th ed. Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc., Los Altos, California, 2007. 782 p.
- [Zhang, Suen, 1984] *Zhang T. Y., Suen C. Y.* A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns // *Communications of the ACM*, 1984. V. 27. N. 3. P. 236–239.

SEARCHING PARAMETRIC CURVES IN IMAGES

A. E. Levashov, D. V. Yurin

Moscow State University, Moscow

Multi-stage search of parametric curves in the image is proposed. Firstly, we search the edge curves. Then after several preparatory procedures the result is stored as chains of connected pixels. These chains are analyzed in whole and by fragments. Analysis of each fragment whether it matches to model or not is performed on the basis of randomized methods. It allows to get high performance by excluding impossible alternates. If this test was passed successfully the accurate model parameters estimation is performed by least squares method and reliability of a hypothesis is checked based on the chi-square criterion. Piecemeal analysis of the curve, the growth phase of the fragment and the fusion of fragments, continuous monitoring of reliability in terms of chi-square allow to find the parametric curves of different types simultaneously and to choose from a set of models the most simple one that describes a curve with an accuracy corresponding to the error of the edge localization.

Keywords: edge detector, parametric curves, vectorization.

Levashov Alexey Evgenevich — student, e-mail: alexeylevashov89@gmail.com.

Yurin Dmitry Vladimirovich — senior scientist laboratory, PhD, e-mail: yurin_d@inbox.ru

СТРУКТУРНЫЙ ГРАФ ЦВЕТОВЫХ СГУСТКОВ: СТРУКТУРЫ КОНТРАСТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

К. И. Кий

*Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики
им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН), Москва*

В работе вводится структура контрастов цветного изображения и определяются новые разновидности точек, линий и областей интереса на изображении: виртуальные точки границ контрастных областей, виртуальные кривые границ контрастных областей и виртуальные контрастные области на изображении. Структура контрастов и эти виртуальные точки, кривые и области определяются с помощью структурного графа цветовых сгустков, получаемого методом геометризованных гистограмм.

Ключевые слова: компьютерное зрение, понимание изображений, сегментация изображений, зрение роботов.

Введение

Определению областей и точек интереса с целью поиска заданных объектов и анализа пар изображений (анализ движения, видео последовательностей, стерео анализ) посвящено много публикаций [Mikolajczyk et al., 2005; Mishra, Aloimonos, 2009]. Эти работы по данному направлению имеют дело в основном с пиксельными множествами [Mikolajczyk et al., 2005], что серьезно затрудняет использование разработанных методов в реальном времени. Кроме того качество получаемых результатов на сложных сценах с заслонениями может быть недостаточным. Например, при решении навигационных задач при движении автономного робота и при решении роботом интеллектуальных задач (создание робота ассистента) возникают серьезные проблемы [Mishra, Aloimonos, 2009].

Автором разработан метод геометризованных гистограмм [Kiy, 2010, 2010], в котором цветные изображения с точностью, достаточной для решения многих задач обработки изображений, задаются структурами отрезков (структурными графами цветовых сгустков). Этот метод позволяет формализовать понятие контрастного объекта и контрастных граничных точек объектов на изображениях. При этом контрастные граничные точки отыскиваются, минуя стадию пиксельной сегментации и, следовательно, могут быть найдены с помощью алгоритмов реального времени.

Существует много методов нахождения контуров [Forsyth, Ponce, 2003], однако обнаружение тех, которые являются границами реальных объектов, важно, например, для задач выделения объектов и анализа движений в кадре (особенно в случае, когда движения происходят на разных уровнях и объекты имеют разные размеры и движутся в разных направлениях и, наиболее существенно, когда съемка ведется с движущегося объекта — мобильного робота). В работе предлагаются методы выделения виртуальных контрастных граничных точек объектов, самих контрастных объектов на основе геометризованных гистограмм и обсуждаются вопросы их применения.

Кий Константин Иванович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail:kikip_46@mail.ru.

1. СТРУКТУРНЫЙ ГРАФ ЦВЕТОВЫХ СГУСТКОВ И СТРУКТУРА КОНТРАСТОВ

Для получения структурного графа цветových сгустков, изображение разбивается на узкие полосы одинаковой ширины параллельные вертикальной или горизонтальной оси изображения. Структурный граф разбивается на слои, каждый из которых соответствует некоторой полосе разбиения. С помощью процедур, приведенных в работах [Kiy, 2010; Кий, 2010, 2011], каждая полоса сжато описывается с помощью системы цветových сгустков — отрезков на оси системы координат плоскости изображения O_s , которой параллельны стороны полос разбиения, снабженных числовыми характеристиками: $[IntBeg, IntEnd]$ — начало и конец отрезка сгустка на оси O_s ; $\Delta_H = [H_{min}, H_{max}]$ и H_{mean} — диапазон и среднее значение цветového оттенка сгустка; $\Delta_S = [S_{min}, S_{max}]$ и S_{mean} — диапазон и среднее значение цветového насыщения; $\Delta_I = [I_{min}, I_{max}]$ и I_{mean} — диапазон и среднее значения полутоновой компоненты сгустка, и мощность сгустка *Card* (приблизительно, число точек в прообразе интервала в полосе, которые имеют цветové характеристики, принадлежащие диапазонам цветového сгустка). Неформально, каждый сгусток дает описание некоторой части реального объекта в полосе, его проекцию на ось O_s и описание значений численных характеристик этой части объекта. Структурный граф цветových сгустков можно интерпретировать геометрически с помощью наложения его отрезков на центральную линию соответствующей полосы. Такие геометрические интерпретации соответствующих изображений могут быть найдены в [Kiy, 2010; Кий, 2010, 2011; Colorvision, 2009; Cosmos, 2010]. Многочисленные примеры показывают, что структурные графы цветových сгустков содержат наиболее существенную информацию об изображениях.

В данной работе мы задаем дополнительные структуры, которые позволяют найти базисные элементы, «порождающие» соответствующие участки полосы; выделить текстурные области, «покрытие» изображения базисными цветowymi сгустками и выделяем соседние с ними с контрастными границами перехода.

Пусть $bunch_1$ — некоторый цветовой сгусток. Обозначим $dens(bunch_1)$ плотность его точек в полосе $dens(bunch_1) = Card_1/L([IntBeg_1, IntEnd_1])$ (мощность деленная на длину интервала). Рассмотрим все цветové сгустки, интервалы которых пересекают интервал $[IntBeg_1, IntEnd_1]$ цветového сгустка $bunch_1$. Введем на интервале $[IntBeg_1, IntEnd_1]$ две функции: $N(x)$ — число цветových сгустков, интервалы которых проходят через точку x , и $Max(x) = \max_i(dens(bunch_i))$ (максимум плотностей всех цветových сгустков, проходящих через точку x). Цветовой сгусток $bunch_1$ порождает участок полосы, соответствующий некоторому интервалу $[a, b] \subset [IntBeg_1, IntEnd_1]$ на оси O_s , если в каждой точке $x \in [a, b]$, $Max(x) = dens(bunch_1)$ (свойство максимальности сгустка в точке x) и существует подинтервал $[c, d] \subset [a, b]$, такой что $N(x) = 1, x \in [c, d]$. Пусть $bunch_1$ и $bunch_2$ — два цветových сгустка с пересекающимися интервалами, порождающие участки полосы, сформулируем правила определения контраста между данными цветowymi сгустками. Предположим, что для этих двух сгустков $IntEnd_1 > IntBeg_2$ и в точках $IntBeg_2 - 1$ ($IntEnd_1 + 1$) выполнены свойства максимальности сгустка $bunch_1$ ($bunch_2$). В этом случае мы говорим, что два соседних порождающих сгустка находятся в общем положении, и формулируем правила контрастности между ними. На основе многочисленных собственных экспериментов с реальными изображениями, используя исследования психологов и нейрофизиологов [Forsyth,

Ronсе, 2003], можно сделать заключение, что правила определения контраста зависят от диапазонов интенсивностей и насыщения рассматриваемых сгустков. При сгустках расположенных в темной области, разность в оттенке воспринимается значительно слабее, а при большом насыщении разность насыщений значит меньше, чем при малом. Поэтому правила определения контраста будут различны в разных диапазонах изменения цветовых характеристик.

Предположим, что значения S имеют значения от 0 до 15, значения I разделены на 8 зон от 0 до 7 и значения H разделены на 6 зон от 0 до 5. Поставим в соответствие каждому цветовому сгустку интервалы изменения цветовых параметров $Var_H = [H_{\min}^1, H_{\max}^1]$, $Var_S = [S_{\min}^1, S_{\max}^1]$, $Var_I = [I_{\min}^1, I_{\max}^1]$, симметризованные относительно H_{mean} , S_{mean} и I_{mean} по минимальному отклонению от среднего, чтобы исключить до некоторой степени влияние случайных выбросов.

Для каждого квантового значения и каждой зоны установлены пороги:

$$s_{pos}(x), s_{impos}(x), x \in [0, 15]; \quad s_{pos}(x), s_{impos}(x), x \in [0, 15]; \quad i_{pos}(x), i_{impos}(x), x \in [0, 7].$$

Однако пороги носят вспомогательный характер и используются только для того, чтобы отбросить очевидные варианты. Нижние границы взяты возможно низкими, а верхние границы взяты возможно большими. Данные пороги для каждого квантованного значения устанавливаются экспериментально. Рассматриваются разности средних значений основных параметров $hue_diff = \text{abs}(H_{mean}(bunch_1), H_{mean}(bunch_2))$, $sat_diff = \text{abs}(S_{mean}(bunch_1), S_{mean}(bunch_2))$ и $inten_diff = \text{abs}(I_{mean}(bunch_1), I_{mean}(bunch_2))$. Вводятся переменные hue_close , sat_close , $inten_close$. Строится система продукций, которая на основе переменных hue_diff , sat_diff , $inten_diff$, взаимоотношения отрезков Δ_H , Δ_S , Δ_I , Var_H , Var_S , Var_I , зон квантования параметров H_{mean} , S_{mean} и I_{mean} присваивает hue_close , sat_close , $inten_close$ значения из множества $\{3, 2, 1, 0, -1, -2, -3\}$ для сгустков $bunch_1$ и $bunch_2$ с близкими или пересекающимися интервалами $[IntBeg_1, IntEnd_1]$ и $[IntBeg_2, IntEnd_2]$.

В случае, когда колебания hue_diff , sat_diff , $inten_diff$ не превосходят нижних или превосходят верхние значения порогов, правила определения контраста достаточно простые. Если значения этих переменных находятся между верхними и нижними значениями порогов, правила усложняются и вовлекают все дополнительные переменные. При этом делается попытка формализовать свойство человеческого зрения: хорошо видеть разницу между объектами с близкими цветовыми характеристиками, для которых цветовые диапазоны разделены. Для этих целей строится функция $Discr(hue_close, sat_close, inten_close)$, принимающая значения $\{4, 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3, -4\}$. Если положительна $Discr$, то она определяет похожесть интервалов с разными степенями похожести. Если отрицательна, то — степень контраста между сгустками. Как уже отмечено выше, для различных цветовых диапазонов строятся свои разрешающие правила и своя функция $Discr(hue_close, sat_close, inten_close)$. Кроме значений этой функции при принятии решения о контрастности цветовых сгустков принимаются во внимание такие параметры как соотношение размеров отрезков рассматриваемых сгустков и отношение их плотностей. Из самой процедуры определения контрастности сгустков ясно, что в отличие от обычного поиска граничных точек, речь идет о контрастности, которая имеет место в достаточно большой окрестности контура (контрастность между сгустками).

Заметим, что мы находим чисто алгебрологическими операциями не контурные точки на изображении, а контрастные сгустки на графе цветовых сгустков.



Структура контрастов для сцены в помещении

Поэтому введенные объекты интереса называются виртуальными. В общем случае, каждой паре контрастных сгустков соответствует интервал их пересечения (контрастный интервал). В случае, когда соседние цветовые сгустки соответствуют граничащим вертикальным (горизонтальным) объектам, контрастные интервалы вырождаются в точки (пары точек). При наложении контрастных интервалов на средние линии полос изображения, мы получаем некоторое приблизительное описание части контуров на изображении, которые являются границами областей. Таким образом, задается еще один тип объектов интереса на изображениях. Кроме того такое комплексное описание позволяет находить непрерывные системы контрастных отрезков, которые определяют виртуальные границы областей на изображении, а также исследовать движение данных виртуальных кривых на последовательности изображений. Этим вопросам будут посвящены следующие более детальные публикации.

Приведем в заключение пример нахождения виртуальных контрастных точек (см. рисунок). Граф цветовых сгустков наложен на полутоновую компоненту изображения. Границы контрастных цветовых сгустков имеют вертикальные отрезки на конце.

Литература

- [Кий, 2010] *Кий К. И.* Модифицированный метод геометризованных гистограмм и его применение // Докл. 8-й Международ. конф. «Интеллектуализация обработки информации ИОИ-2010». М.: МАКС ПРЕСС, 2010. С. 367–370.
- [Кий, 2011] *Кий К. И.* Автоматическая система реального времени для обнаружения объектов и ориентиров на изображении, основанная на обработке цветных изображений // Техн. зрение в системах управления мобильными объектами-2010: Тр. научно-техн. конф.-семинара. Вып. 4 / Под ред. Р. Р. Назирова. М.: КДУ, 2011. С. 268–276.
- [Colorvision, 2009] Colorvision 2009. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://sites.google.com/site/colorvisionkikiy/>.
- [Cosmos, 2010] Cosmos 2010. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://tz2010.cosmos.ru/>.
- [Forsyth, Ponce, 2003] *Forsyth D. A., Ponce J.* Computer Vision: a Modern Approach. N. Y.: Prentice Hall, 2003.
- [Kiy, 2010] *Kiy K. I.* A New Real-Time Method for Description and Generalized Segmentation of Color Images // Pattern Recognition and Image Analysis. 2010. N. 2. P. 169–178.

- [Mikolajczyk et al., 2005] *Mikolajczyk K., Tuytelaars T., Schmid C., Zisserman A., Matas J., Schafalitzky F., Kadir T., Van Gool L.* A Comparison of Affine Region Detectors // Intern. J. Computer Vision. 2005. V. 65. N. 1/2.
- [Mishra, Aloimonos, 2009] *Mishra A. K., Aloimonos Y.* Active segmentation // Intern. J. Humanoid Robotics. 2009. V. 6(3). P. 361–386.

STRUCTURAL GRAPH OF COLOR BUNCHES: CONTRAST STRUCTURES AND THEIR APPLICATION

K. I. Kiy

Keldysh institute of applied mathematics RAS (IAM RAS), Moscow

In this paper, the structure of contrasts of a color image is introduced and new types of salient points, curves and regions are determined: virtual points of boundaries of contrast regions, virtual curves of boundaries of contrast regions, and virtual contrast regions in images. Structures of contrasts and these virtual points, curves, and regions are defined using the structural graph of color bunches obtained with the use of geometrized histogram method.

Keywords: computer vision, image understanding, image segmentation, robot vision.

Kiy Konstantin Ivanovich — senior researcher, PhD, e-mail: kikip_46@mail.ru.

ОПИСАНИЕ ФОРМЫ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ПРИ ПОМОЩИ ГИБКИХ СТРУКТУРИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ю. В. Визильтер, В. С. Горбацевич

*ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт
авиационных систем» (ГосНИИАС), Москва*

Предложен способ описания формы двумерных объектов при помощи гибких структурирующих элементов, реализуемых методами линейного программирования. Показано, что на их основе могут быть определены несколько видов морфологических фильтров. Данный подход позволяет определить инвариантный к масштабу и повороту алгоритм сравнения формы выпуклых фигур, устойчивый к частичным загораживаниям.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 11-08-01114-а, 11-08-01039-а).

Ключевые слова: обработка изображений, математическая морфология, сравнение по форме.

Введение

В задачах технического зрения на этапе распознавания обнаруженных объектов интереса часто возникает задача описания формы объектов — как наблюдаемых, так и хранящихся в базе эталонов. Причем помимо компактности такого описания, желательно чтобы оно было устойчивым к ряду наиболее часто встречаемых геометрических искажений. Например, формы объектов либо искажений типа «загораживания». В настоящее время существует множество различных вариантов решения задачи описания формы двумерного объекта — цепные коды, Фурье дескрипторы [Гонсалес, Вудс, 2005], скелетные представления [Местецкий, 2009] и др.

В данной работе предлагается использовать для описания геометрической формы объектов так называемые «гибкие структурирующие элементы», параметры которых определяются методом линейного программирования. Как показывают проведенные на модельных изображениях эксперименты, полученное таким образом описание при достаточной компактности обладает хорошей устойчивостью к искажениям типа загораживания, а также позволяет легко реализовать инвариантную к изменениям масштаба и повороту процедуру сравнения подобных описаний.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ЛП-ОТКРЫТИЕ И ЛП-РАЗЛОЖЕНИЕ ОДНОМЕРНЫХ ФУНКЦИЙ

Классическая *задача линейного программирования* (ЗЛП) предполагает минимизацию по линейной целевой функции вида:

Визильтер Юрий Валентинович — начальник лаборатории компьютерного машинного зрения, старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук, e-mail: viz@gosniias.ru
Горбацевич Владимир Сергеевич — инженер лаборатории компьютерного машинного зрения, e-mail: gvs@gosniias.ru.

с учетом линейных ограничений

$$\begin{aligned} a_{11}y_1 + \dots + a_{1n}y_n &= b_1, \\ \dots \\ a_{m1}y_1 + \dots + a_{mn}y_n &= b_m, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} y_1 \dots y_n &\geq 0; \\ b_1 \dots b_m &\geq 0. \end{aligned}$$

Пусть теперь на отрезке дискретной числовой оси $X = [x_1, \dots, x_m]$ заданы неотрицательная функция $f(x)$ и набор линейно независимых неотрицательных функций $\mathbf{g}(x) = \langle g_1(x), \dots, g_n(x) \rangle$. Рассмотрим задачу нахождения такой линейной комбинации

$$G(x) = y_1 g_1(x) + \dots + y_n g_n(x),$$

которая удовлетворяла бы по X ограничению

$$f(x) \geq G(x),$$

и при этом площадь под графиком функции $G(x)$ была максимально возможной. Иными словами, речь идет о нахождении максимальной в смысле нормы L^1 описанной функции для заданной неотрицательной функции f , принадлежащей линейному пространству неотрицательных одномерных дискретных функций с базисом. Легко убедиться, что данная задача может быть записана в стандартной форме ЗЛП

$$\begin{aligned} Q(y) &= - \sum_{i=1 \dots m} G() = - \sum_{i=1 \dots n} \left\{ \sum_{i=1 \dots m} g_i() \right\}, \\ y_1 x_1 + \dots + y_n x_1 + b_1 &= f(x_1), \\ \dots \\ y_1 x_m + \dots + y_n x_m + b_m &= f(x_m), \\ b_1 b_m. \end{aligned}$$

Данная задача однозначно решается методом линейного программирования (ЛП), и таким образом оказывается определен оператор ЛП-проекции функции $f(x)$ на базис $\mathbf{g}(x)$:

$$\psi_{\mathbf{g}} : G() = \psi_{\mathbf{g}} f(x).$$

Этот оператор является проективным (идемпотентным), поскольку при повторном вычислении оптимальное значение не изменится

$$\psi_{\mathbf{g}} = \psi_{\mathbf{g}}^2.$$

Кроме того, поскольку выполняется условие

$$f() \psi_{\mathbf{g}} f(x),$$

оператор ЛП-проекции является монотонным неувеличивающим проектором, то есть *морфологическим фильтром* в смысле Серра [Serra, 1982], и поэтому может быть назван *ЛП-открытием для одномерных функций*. При этом вектор весов $\mathbf{y}(f)$ можно назвать *вектором ЛП-разложения $f(x)$ по базису*.

ГИБКИЕ СТРУКТУРИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Перейдем теперь к задаче описания формы двумерных бинарных фигур. Исследуем описание формы фигуры в полярных координатах $\langle \theta, f(\theta) \rangle$ относительно некоторой ее внутренней точки P . Для выпуклой фигуры такое описание содержит полную информацию о форме (рис. 1).

В случае невыпуклой фигуры \mathbf{B} определим минимальную радиус-функцию

$$f'(\theta) = \min r \geq 0 \quad \{r : \langle \theta, r + \partial r \rangle \notin \mathbf{B}\},$$

где $\langle \theta, r \rangle$ — точка в полярных координатах; ∂r — малое приращение r . При этом

$$\mathbf{B}' = \{ \langle \theta, r \rangle : r < f'(\theta) \},$$

т. е. фигура \mathbf{B}' лежит целиком внутри исходной фигуры $\mathbf{B}' \subseteq \mathbf{B}$. Поскольку функция $f'(\theta)$ одномерная, то зафиксируем некоторый набор дискретных значений угла $\Theta = [0, \dots, 2\pi - \Delta\theta]$ ЛП-открытия фигуры \mathbf{B}' в полярных координатах полностью аналогично тому, как это было сделано выше для обычных одномерных функций. Более того, поскольку $\mathbf{B}' \subseteq \mathbf{B}$ данный оператор будет также и проективным оператором *полярного ЛП-открытия* фигуры \mathbf{B} . В качестве структурирующих параметров морфологического оператора полярного ЛП-открытия выступают полюс P и базис радиальных функций $\mathbf{g}(\theta)$. Обозначим

$$\psi_P \mathbf{B} = \text{Pr}(\mathbf{B}, P, \mathbf{g}(\theta)).$$

Получаемое *ЛП-разложение* $y(\mathbf{B})$ является вектором признаков формы \mathbf{B} :

$$\varepsilon_P \mathbf{B} = y(\mathbf{B}, P, \mathbf{g}(\theta)).$$

В качестве базиса разложения может выступать любой набор неотрицательных линейно независимых функций. В данной работе предложено рассматривать набор повернутых образов одной и той же выпуклой фигуры, заданных эталонной функцией $g(\theta)$. На рис. 2 показаны варианты формирования различных функций $g(\theta)$ на основе эллиптического структурирующего элемента при помощи различного выбора полюса P .

Таким образом для фигуры \mathbf{B} , фиксированного базиса \mathbf{g} и полюса P оператор ψ_P однозначно определяет фигуру $\psi_P \mathbf{B} \subseteq \mathbf{B}$. По аналогии с терминологией морфологии Серра будем называть эту фигуру **гибким структурирующим элементом** (рис. 3).

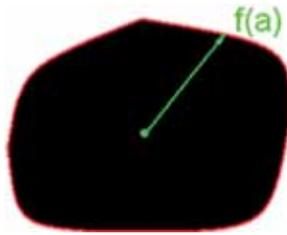


Рис. 1. Полярное описание формы фигуры при помощи радиус-функции $f(\theta)$

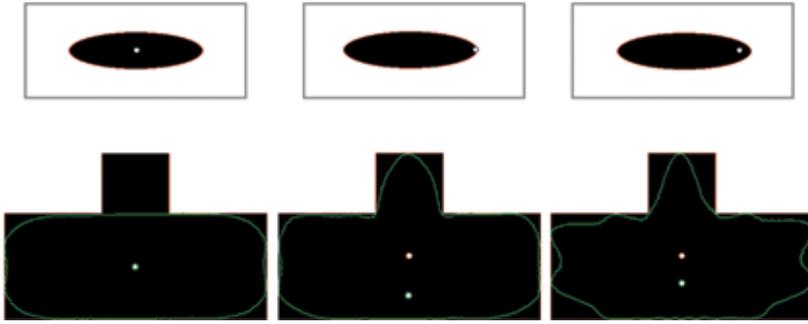


Рис. 2. Варианты формирования эталонной базовой функции $g(\theta)$ (сверху) и соответствующих ЛП проекций (снизу) при размерности базиса $n = 32$



Рис. 3. Пример описания формы с использованием гибких структурирующих элементов. Показаны полюсы элементов

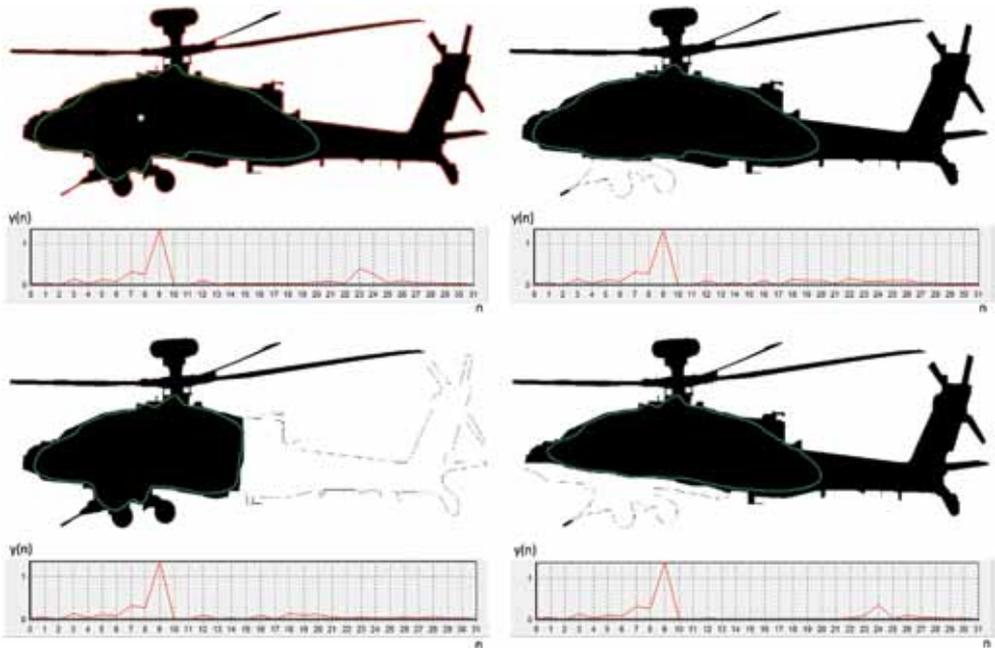


Рис. 4. Пример влияния «загораживания» на коэффициенты разложения

УСТОЙЧИВОСТЬ ОПИСАНИЯ ФОРМЫ К ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯМ И ИСКАЖЕНИЯМ

Легко убедиться, что масштабные преобразования фигуры приводят к пропорциональным масштабным преобразованиям коэффициентов разложения, а поворот фигуры соответствует циклическому сдвигу коэффициентов разложения. Кроме того, особенность гибких структурирующих элементов — их высокая устойчивость к искажениям формы фигуры. Так, загораживание части фигуры (рис. 4) приводит к ослаблению лишь некоторых элементов разложения, практически не затрагивая остальные. Таким образом, используя стандартные техники сравнения одномерных сигналов, можно получить инвариантный к масштабу и повороту алгоритм сравнения формы выпуклых фигур, устойчивый к частичным загораживаниям.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАТОРЫ ЛП-ЗАМЕТАНИЯ ФИГУРЫ

Перейдем теперь к построению морфологий типа Серра на основе «заметания». Классическое открытие в математической морфологии Серра с фиксированным структурирующим элементом представляет собой *объединение всех вписанных структурирующих элементов заданной формы и заданного размера*. В случае ЛП-морфологии эта техника заполнения («заметания») может быть обобщена с использованием гибкого структурирующего элемента. В качестве «размера» используем, например, площадь τ . Тогда *морфологический проектор на основе ЛП-заметания* фигуры \mathbf{B} гибкими элементами, производными от \mathbf{g} , имеет вид

$$\psi_t \mathbf{B} = \cup_{p \in \mathbf{B}} \{ \psi_p \mathbf{B} : \tau(\psi_p \mathbf{B}) \geq t \}.$$

При $t = 0$ $\psi_t \mathbf{B} = \mathbf{B}$, при $t > \tau(\mathbf{B})$ $\psi_t \mathbf{B} = \emptyset$. Это позволяет определить морфологический коэффициент ЛП-корреляции в форме Пытьева:

$$K_t(\mathbf{B}, \mathbf{g}) = \tau(\psi_t \mathbf{B}) / \tau(\mathbf{B}).$$

Данный коэффициент показывает способность гибких элементов площади более t , определяемых образующими из \mathbf{g} , заполнять фигуру \mathbf{B} . Примеры морфологического ЛП-заметания тестовой фигуры элементами различного размера, сформированными на основе фигуры (см. рис. 2), приведены на рис. 5.

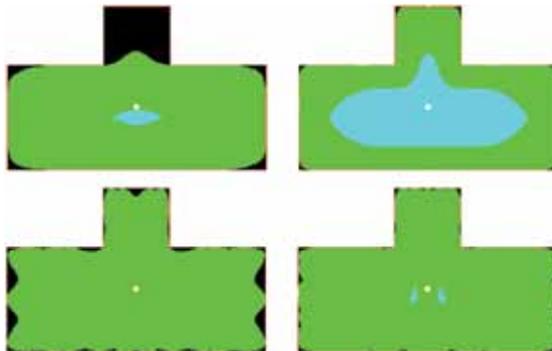


Рис. 5. Примеры морфологического ЛП-заметания фигуры гибкими структурирующими элементами различного размера

Литература

- [Гонсалес, Вудс, 2005] *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
- [Местецкий, 2009] *Местецкий Л. М.* Непрерывная морфология бинарных изображений. Фигуры. Скелеты. Циркуляры. М.: Физматлит, 2009.
- [Serra, 1982] *Serra J.* Image Analysis and Mathematical Morphology. L.: Academic Press, 1982.

IMAGE SHAPE DESCRIPTION USING FLEXIBLE STRUCTURING ELEMENTS

Yu. V. Vizilter, V. S. Gorbachevich

*Federal State Unitary Enterprise "State Research Institute of Aviation System"
(GOSNIIAS), Moscow*

The approach for 2D objects shape description is proposed based on flexible structuring elements implemented by means of linear programming. It is proved that two types of morphological filters can be designed this way. This approach allows constructing the scale and rotation invariant algorithm for object shape comparison with high robustness relative to partial occlusion of the object.

Keywords: image processing, mathematical morphology, shape comparison.

Vizilter Yuriy Valentinovich — head of laboratory for computer and machine vision, doctor of sciences, e-mail: viz@gosniias.ru.

Gorbachevich Vladimir Sergeevich — engineer, e-mail: gvs@gosniias.ru.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБУЧАЕМЫХ АЛГОРИТМОВ БЫСТРЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

А. Ю. Дорогов

*ОАО «Информационные телекоммуникационные технологии»
(«Интелтех»), Санкт-Петербург*

Рассматриваются теоретические основы построения обучаемых алгоритмов одномерных быстрых спектральных преобразований. Синтез алгоритмов основан на системном инварианте быстрых преобразований и лингвистических моделях топологических реализаций. Предложен алгоритм настройки преобразований по эталонной функции. Приведены примеры.

Ключевые слова: Алгоритм быстрого преобразования, системный инвариант, топологическая схема, приспособленное преобразование, фрактальная декомпозиция.

Введение

Разработку алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ), безусловно, можно считать одним из выдающихся достижений второй половины XX в. Появление алгоритма БПФ стимулировало интерес и к другим видам спектральных преобразований. В задачах фильтрации, сжатия и выделения информативных признаков широкое применение нашли преобразования Адамара — Уолша, Хаара, Виленкина — Кристенсона, Хартли, Наклонное, Вейвлет и другие, также обладающие быстрыми алгоритмами. Несмотря на отличия по видам функций оказалось, что большинство алгоритмов быстрых преобразований имеют подобную структуру и отличаются друг от друга не больше чем значениями коэффициентов базовых операций. Осознание этого факта привело к идее построения обобщенных перестраиваемых спектральных преобразований наделенных быстрым алгоритмом. Первые предложения по построению обобщенного ортогонального преобразования были высказаны Эндрюсом и Каспари [Andrews, Caspari, 1970] в 70-х годах прошлого века, а первые подходы к обучению подобных преобразований были развиты в работах А. И. Солодовникова и его группы [Солодовников, Спиваковский, 1986]. В то время подобный класс преобразований называли *приспособленными* быстрыми преобразованиями.

Возможность перестройки значений весовых коэффициентов и многослойная структура алгоритма роднит быстрые перестраиваемые преобразования с многослойными нейронными сетями прямого распространения. Иногда используют термин — ортогональные нейронные сети. В рамках данной парадигмы быстрые линейные перестраиваемые преобразования являются частным случаем быстрых нейронных сетей [Дорогов, 2004a] и отличаются от последних линейными функциями активации и нулевыми смещениями в нейронах.

Типичной задачей для перестраиваемого преобразования является настройка на заданную систему базисных функций, например базис Фурье, Адамара — Уолша и др. Классические системы базисных функций, как правило, имеют аналитическую форму, поэтому настройка преобразования также выполняется в аналитическом виде. Важной задачей для синтеза оптимальных фильтров является

Дорогов Александр Юрьевич — главный научный сотрудник, доцент, доктор технических наук, e-mail: vaksa2006@yandex.ru.

построение быстрых преобразований, приспособленных к произвольной эталонной функции или ограниченному набору функций.

В основе алгоритмов настройки лежит доказанное свойство структурной фрактальности БНС, представленное системным инвариантом [Дорогов, Шестопалов, 2007]. Фрактальные свойства позволяют реализовать регулярные фрактальные последовательности как многослойные БНС. Идея метода настройки перестраиваемого преобразования к одной или нескольким функциям основана на представлении каждой функции заданного набора в виде фрактального произведения, отвечающего мультипликативной форме представления элементов матрицы быстрого преобразования.

1. ЦЕЛЬ ОБУЧЕНИЯ ОРТОГОНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Для задач классификации и распознавания сигналов существенное значение имеют процедуры предварительной обработки, ориентированные на устранение избыточности и выделение информативных признаков. Использование ортогональных преобразований для этих целей позволяет представить информацию, содержащуюся в исходном сигнале, в виде взаимно-независимых спектральных составляющих. Известно, что максимальное сокращение избыточности данных обеспечивается ортогональным преобразованием Карунена – Лоэва, которое образуется собственными векторами ковариационной матрицы сигнала. Однако использование данного преобразования сопряжено со значительными вычислительными затратами. По этой причине метод Карунена – Лоэва не применяется для обработки данных высокой размерности. Однако, если при построении преобразования Карунена – Лоэва ограничиться только одним собственным вектором, имеющим максимальный ранг (главной компонентой), то объем вычислений резко сокращается. Достаточно часто главную компоненту можно выделить из сигнала непосредственно как опорный образ, относительно которого наблюдаются все сигнальные вариации. Ортогональное преобразование, которое настроено на одну главную компоненту относится к классу приспособленных. В силу ортогональности результатом воздействия приспособленного преобразования на опорный образ будет выходной вектор, у которого одна из координат равна единице, в то время как все остальные координаты равны нулю. Для задачи классификации данная схема идеальна. Таким образом, цель обучения состоит в том, чтобы построить ортогональное преобразование, приспособленное к заданной функции.

2. АЛГОРИТМ ОБУЧЕНИЯ

В работе Гуда [Good, 1958] впервые было показано, что элементы матрицы быстрого преобразования Фурье можно представить в виде произведения элементов матриц базовых операций. На рис. 1 приведен граф быстрого преобразования в топологии Гуда с явным выделением базовых операций. В терминах нейронной сети базовая операция — это однослойная нейронная сеть с размерностью рецепторного и аксонового полей равной 2.

Базовую операцию определим матрицей $W_{i_m}^m$, где m — номер слоя; i_m — номер базовой операции в пределах слоя. Элементы матриц базовых операций обозначим через $w_{i_m}^m(u_m, v_m)$, где u_m, v_m — определяют номер строки и номер столбца

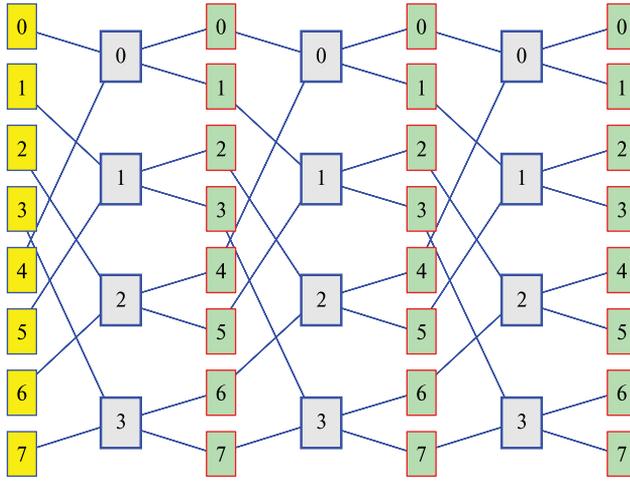


Рис. 1. Топологическая схема Гуда для размерности быстрого преобразования 8 с явным выделением базовых операций

матрицы базовой операции. В алгоритмах быстрых преобразований удобно использовать нумерацию индексов, начиная с нулевого значения. Гуд показал, что элементы матрицы быстрого преобразования размерности $N = 2^x$ могут быть представлены в виде:

$$h(U, V) = w_{i^{x-1}}^{x-1}(u_{x-1}, v_{x-1}) w_{i^{x-2}}^{x-2}(u_{x-2}, v_{x-2}) \dots w_{i^1}^1(u_1, v_1) w_{i^0}^0(u_0, v_0), \quad (1)$$

где

$$u = \langle u_0 u_1 \dots u_{x-2} u_{x-1} \rangle, \quad v = \langle v_0 v_1 \dots v_{m-1} v_{x-1} \rangle, \quad i^m = \langle u_{m+1} \dots u_{x-1} v_0 v_1 \dots v_{m-1} \rangle. \quad (2)$$

Здесь угловые скобки используются для поразрядного представления чисел в системе счисления с онованием 2, например:

$$u = \langle u_0 u_1 \dots u_{x-2} u_{x-1} \rangle = u_0 2^{x-1} + u_1 2^{x-2} + \dots + u_{x-2} 2 + u_{x-1}.$$

Решающее значение для построения обобщенного алгоритма обучения имело доказанное автором положение [Дорогов, 2004б], что любая дискретная функция $f(u)$, заданная на интервале $N = 2^x$ также может быть представлена в виде произведения

$$f(u) = \Phi_{i^{x-1}} \Phi_{i^{x-2}} \dots \Phi_{i^1} \Phi_{i^0}, \quad (3)$$

где номер $i^m = \langle u_{m+1} \dots u_{x-1} \rangle$ сомножителя подчинен топологии быстрого преобразования.

Ортогональное преобразование выполняет трансформацию входного вектора x в выходной вектор y . Будем полагать, что вектора представляются строками, тогда в матричной форме преобразование векторов запишется в виде:

$$y = xH,$$

где H — матрица преобразования. Для ортогональных преобразований удобно использовать конструктивное определение условия приспособленности, которое можно сформулировать следующим образом. Ортогональное преобразование,

заданное матрицей $h(u, v)$, приспособлено к функции $f(u)$ по столбцу s , если выполнены условия

$$\begin{cases} \sum_u h(u, v) f(u) = 1 & \text{при } v = s, \\ \sum_u h(u, v) f(u) = 0 & \text{при } v \neq s \end{cases} \quad (4)$$

(предполагается, что опорная функция нормирована условием: $\sum_u f^2(u) = 1$).

Подставив в левую часть (4) выражения (1) и (3) после преобразований получим

$$\begin{aligned} \sum_u h(u, v) f(u) &= \sum_{u_0} w_{i_0}(u_0, v_0) \Phi_{i_0}(u_0) \sum_{u_1} w_{i_1}(u_1, v_1) \Phi_{i_1}(u_1) \times \dots \times \\ &\times \sum_{u_{\kappa-1}} w_{i_{\kappa-1}}(u_{\kappa-1}, v_{\kappa-1}) \Phi_{i_{\kappa-1}}(u_{\kappa-1}). \end{aligned}$$

Из данной формулы, очевидно, что приспособленность спектрального преобразования обеспечивается, когда ядра любого слоя m приспособлены к соответствующим компонентам фрактального разложения опорной функции

$$\begin{cases} \sum_{u_m} w_{i_m}(u_m, v_m) \Phi_{i_m}(u_m) = 1 & \text{при } v_m = s_m, \\ \sum_{u_m} w_{i_m}(u_m, v_m) \Phi_{i_m}(u_m) = 0 & \text{при } v_m \neq s_m. \end{cases}$$

где $s = \langle s_0 s_1 \dots s_{m-1} s_{\kappa-1} \rangle$.

Таким образом, задача настройки быстрого приспособленного спектрального преобразования сводится к построению приспособленных ортогональных ядер. Наиболее просто построить ортогональные ядра второго порядка. Для этого достаточно из эталонной функции $\varphi(u_m) = [\varphi(0) \varphi(1)]$, заданной на интервале длиной 2, выделить постоянную и переменную составляющие и отнормировать их по энергии к единице. Две полученные компоненты, очевидно, будут ортогональны между собой. В общем случае для построения ортогональных ядер следует использовать процедуру ортогонализации Грамма – Шмидта.

Построенные ортогональные ядра размещают в матрицах Гуда в соответствии с топологическими правилами (2). Следует отметить, что в алгоритме обучения не полностью используются степени свободы перестраиваемого преобразования. Если функция приспособления совпадает с нулевым столбцом результирующей матрицы, то будут настроены только ядра с номерами $i^m = \langle u_{m+1} \dots u_{\kappa-1} 0_0 0_1 \dots 0_{m-1} \rangle$.

Рисунок 2 показывает факторизованное представление ортогонального преобразования приспособленного к одной функции, размещенной в нулевом столбце. Символом * отмечены элементы незаполненных ядер, а единицами ненулевые значения.

Для того чтобы преобразование было ортогональным, достаточно заполнить свободные ядра элементами любых ортогональных матриц соответствующей размерности. В практических алгоритмах можно либо заполнить свободные ядра единичными матрицами вида: $W = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, либо повторить ядра, уже найденные

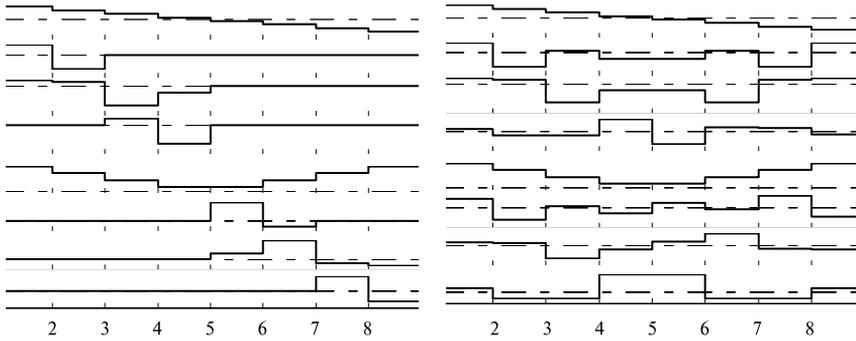


Рис. 2. Свободные параметры быстрого ортогонального преобразования Гуда, приспособленного к функции размещенной в нулевом столбце

v_0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
v_1	0	0	1	1	0	0	1	1		0	0	1	1	0	0	1	1		0	0	1	1	0	0	1	1	
v_2	0	1	0	1	0	1	0	1		0	1	0	1	0	1	0	1		0	1	0	1	0	1	0	1	
u_0	u_1	u_2																									
0	0	0	1	1						1	1								1	1							
0	0	1			1	1					*	*								*	*						
0	1	0				1	1						1	1								*	*				
0	1	1						1	1						*	*								*	*		
1	0	0	1	1						1	1								1	1							
1	0	1			1	1					*	*								*	*						
1	1	0				1	1						1	1								*	*				
1	1	1					1	1					*	*										*	*		

Рис. 3. Свободные параметры быстрого ортогонального преобразования Гуда, приспособленного к функции размещенной в нулевом столбце

для текущего слоя. В первом случае будут получены вейвлет-подобные ортогональные преобразования с явно выраженными свойствами пространственной локализации, во втором — все столбцы преобразования будут содержать примерно равное число ненулевых элементов.

Рисунок 3 представляет развертку столбцов быстрых ортогональных преобразований, приспособленных к линейно-изменяющейся опорной функции (в нулевом столбце), для двух стратегий выбора ортогональных ядер. Ядра преобразования построены по процедуре Грамма – Шмидта без выделения постоянной составляющей.

Заключение

Предложенный алгоритм обучения ортогональной нейронной сети легко обобщается для произвольной размерности преобразований, не кратной степени двойки. Топология быстрого преобразования Гуда использована как пример. Подобный алгоритм может быть реализован для топологии Кули-Тьюки или

любой иной топологии быстрых преобразований. Представленные в работе теоретические основы построения алгоритмов быстрых перестраиваемых преобразований с возможностью обучения априорной информации, позволяют создать высокоэффективные технические средства для адаптивной обработки сигналов и изображений в реальном масштабе времени.

Литература

- [Дорогов, 2004а] *Дорогов А. Ю.* Быстрые нейронные сети: Проектирование, настройка, приложения: Лекции по нейроинформатике. Ч. 1 // Тр. шк.-семинара «Современ. проблемы нейроинформатики» Научно-техн. конф. «Нейроинформатика-2004». 28–30 янв. 2004. Москва. М.: МИФИ, 2004. С. 69–135.
- [Дорогов, 2004б] *Дорогов А. Ю.* Методы настройки быстрых перестраиваемых преобразований // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2004. № 7–8. С. 17–32.
- [Дорогов, Шестопапов, 2007] *Дорогов А. Ю., Шестопапов М. Ю.* Нейросетевое моделирование регулярных фракталов // Нейрокомпьютеры разработка и применение. 2007. № 6.
- [Солодовников, Спиваковский, 1986] *Солодовников А. И., Спиваковский А. М.* Основы теории и методы спектральной обработки информации. Л.:, 1986. 272 с.
- [Andrews, Caspari, 1970] *Andrews H. C., Caspari K. L.* A General Techniques for Spectral Analysis // IEEE. Trans. Computer. 1970. V. C-19. Jan. N. 1. P. 16–25.
- [Good, 1958] *Good I. J.* The Interaction Algorithm and Practical Fourier Analysis // J. Royal Statistical Soseity. Ser. B. 1958. V. 20. N. 2. P. 361–372.

THEORETICAL FOUNDATIONS OF TRAINED FAST TRANSFORM ALGORITHMS

A. Yu. Dorogov

It is consider theoretical foundations of trained fast one-dimensional transform spectral algorithms. Synthesis of the algorithms is based on system invariant of fast transformations and linguistic models of topological realizations. Trained algorithm of adjustment to etalon function is suggested. Examples are shown.

Keywords: Fast transform algorithm, system invariant, topological scheme, adapted transformation, fractal decomposition.

ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП КАК СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НАНОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

В. А. Карташев, В. В. Карташев

*Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики
им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН), Москва*

В статье рассматриваются проблемы технического зрения в сканирующей туннельной микроскопии. Описываются способ получения зрительной информации с помощью зонда и вносимые им искажения. Предложен метод обработки, повышающий уровень соответствия рельефа поверхности физическим условиям сканирования. Представлен программный комплекс, реализующий этот способ, и проанализированы результаты его работы.

Ключевые слова: туннельный микроскоп, зондовая микроскопия, нанодиагностика, учет формы зонда, интерпретация измерений СТМ.

Получение изображений нанорельефа с высоким пространственным разрешением представляет собой важный современный метод исследования свойств поверхности. Широко распространенным способом измерения нанорельефа считается сканирование туннельным микроскопом (СТМ) при постоянной величине туннельного тока. Система управления поддерживает такую высоту от конца иглы до поверхности, чтобы величина туннельного тока оставалась постоянной.

В этом режиме сканирования полученные измерения содержат информацию не о рельефе поверхности, а о траектории движения зонда. Необходимое условие её совпадение с рельефом — пренебрежимо малый, по сравнению с точностью позиционирования, диаметр конца иглы. На практике острие иглы имеет конечные размеры, поэтому получить реальное изображение рельефа поверхности подложки можно, только если известна геометрия острия. Если предположить, что она известна, то рельеф сканируемой поверхности определяется с помощью геометрических вычислений, использующих выходные данные сканирования.

Учет параметров формы и размеров острия иглы позволяет увеличить разрешающую способность зондового микроскопа и получить истинные соотношения между размерами наблюдаемых объектов в поле зрения.

Рассмотрим подробно проблему обработки изображения поверхности, полученного от сканирующего туннельного микроскопа с учетом конечного ненулевого радиуса закругления зонда. В работе [Bukharaev, 1998] показано, что методы восстановления рельефа, пригодные для атомно-силового микроскопа, неприменимы к СТМ. Целью исследования определим построение модели зонда СТМ и восстановление формы рельефа поверхности с ее помощью.

Туннельной оболочкой будем называть геометрическую фигуру, которая получается расширением зонда на величину туннельного зазора при измеренной величине туннельного тока. На рис. 1 даны различные варианты туннельных оболочек: рис. 1а — вариант радиуса закругления туннельной оболочки 0,4 нм при

Карташев Владимир Алексеевич — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: kart@list.ru.

Карташев Всеволод Владимирович — младший научный сотрудник, доктор физико-математических наук, e-mail: vsevolod.kartashev@gmail.com.

туннельном зазоре 0,3 нм; рис. 1б — радиус закругления 0,6 нм при туннельном зазоре 0,5 нм; рис. 1в — радиус закругления 0,8 нм при туннельном зазоре 0,6 нм.

Для модели туннельной оболочки учитываются особенности сканирования:

- зависимость тока от расстояния до поверхности экспоненциальная;
- плотность тока на конце зонда не может превышать некоторой величины, так как туннельный ток должен иметь разумную плотность [Мионов, 2004; Карташев, 2010]. Следовательно, размер области, через которую он протекает, оценивается снизу;
- игла окружена туннельным зазором;
- величина туннельного зазора вычисляется исходя из величины туннельного тока;
- задержки в работе пьезопривода и в системе управления пренебрежимо малы.

Это означает, что для почти любой точки поверхности существует некоторый момент времени, в котором расстояние до иглы равно туннельному зазору.

В работе [Карташев, 2010] анализируется алгоритм обработки изображения, который позволяет восстанавливать как рельеф подложки, так и форму туннельной оболочки.

В процессе работы были опробованы три модели туннельных оболочек:

- параболическая (рис. 2а);
- стержень со сферой на конце (рис. 2б);
- конус со сферой на конце (рис. 2в).

В предлагаемом способе обработки рельеф исследуемой поверхности $M(G)$ определяется путем вычисления поверхности пространственной фигуры, которая объединяет геометрии всех получаемых в процессе сканирования туннельных оболочек выбранной формы иглы G

$$M(G) = \bigcup_{i=1}^N \bigcup_{j=1}^K M_{ij}(G).$$

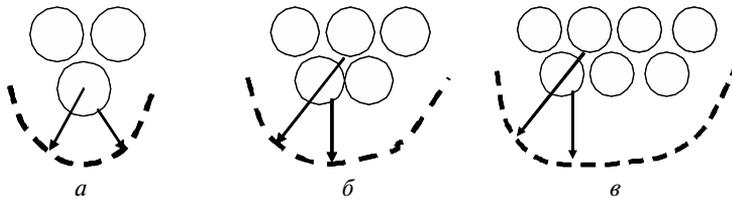


Рис. 1. Варианты туннельных оболочек при различных радиусах закругления кончиков зондов: а — 1 атом на конце зонда; б — 2 атома; в — 3 атома



Рис. 2. Различные модели туннельных оболочек

Здесь $i = 1, \dots, N$ — номер строки сканирования, $j = 1, \dots, K$ номер точки в строке, в которой проводилось измерение, а $M_{ij}(G)$ — вычисляемая в точке измерения с индексами i и j туннельная оболочка иглы формы G .

При решении задачи вычисления модели рельефа, из имеющихся моделей G формы иглы надо выбирать такую, для которой в наибольшем числе узлов k сетки измерений выполняется неравенство

$$\rho(M_k(G), M(G)) \leq \varepsilon, \quad (1)$$

где $\rho(M_k(G), M(G))$ — расстояние от туннельной оболочки k -й точки до поверхности рельефа $M(G)$, ε — параметр алгоритма. Выполнение неравенства (1) означает, что во всех контрольных точках условия взаимодействия зонда с поверхностью наилучшим образом соответствуют модели физических параметров сканирования, записанным в процессе измерения рельефа.

Критерий выполнения условий сканирования в каждом узле (i, j) измерения считается локальным, так как для его проверки не требуется знать геометрию всей области сканирования. Проверка локального критерия может быть выполнена сразу после вычисления очередной точки моделируемого рельефа поверхности $M(G)$.

Дополнительно к локальным критериям, предложим также глобальные критерии выполнения условий сканирования, которые учитывают особенности строения всего рельефа. Для проверки этих критериев должны быть вычислены все точки модели рельефа $M(G)$ и построены двумерная или трехмерная модели поверхности. Следовательно, проверка локальных и глобальных критериев выполнимости условий сканирования должна осуществляться в разных частях программной модели. Заметим, что в описываемом методе интерпретации сигнала туннельного микроскопа, качество найденного решения фактически определяется не точностью получаемого результата обработки измерений (которая неизвестна и принципиально не может быть определена формальным способом), а предложенным способом количественной оценки степени выполнения физических условий процесса сканирования.

Рисунок 3 поясняет работу алгоритма определения формы и размеров острия иглы. Если радиус закругления выбран слишком большим, то для построенного для этой иглы рельефа неравенство (1) нарушается в большинстве точек измерения (отрезки профиля модели рельефа, соответствующие таким точкам, помечены желтым цветом). В случае меньшего радиуса закругления (δ), неравенство выполняется почти во всех узлах сетки измерений.

В работе [Карташев, 2010] рассматривается проблема представления результатов измерений в цветовой модели «высота—цвет из палитры». Показано, что она, вообще говоря, является некорректно поставленной, так как могут быть нарушены условия существования и однозначности ее решения. Предложены различные способы решения задачи, обеспечивающие лучшие условия визуализации нанообъектов по сравнению с условиями, имеющимися в настоящее время.

Кроме того, в работе описан разработанный программный комплекс, который реализует функции интерактивного подбора формы иглы и восстановления формы рельефа поверхности.

Алгоритм определения рельефа основан на достаточно ресурсоемких трехмерных геометрических вычислениях. С целью ускорения расчетов, сложные алгоритмы в программном комплексе реализованы таким способом, чтобы сделать возможным их параллельное выполнение на уровне ядер и процессоров.

Эффективность реализации режима многопоточной обработки подтверждается уменьшением затрат времени на построение модели поверхности практически пропорционально числу задействованных процессоров.

Например, время решения задачи восстановления рельефа поверхности для часто встречающихся случаев описанным выше ресурсозатратным алгоритмом удалось снизить с примерно 10 мин при выполнении в одном потоке до 2...3 мин при выполнении в четырех потоках.

Разработанный программный комплекс применялся в работе по исследованию нанообразований на поверхности различных металлов, нанесенных на стеклянную подложку методом вакуумного напыления. Она выполнялась в РХТУ им. Д. И. Менделеева в 2005–2009 гг. Измерения проводились в воздушной сре-

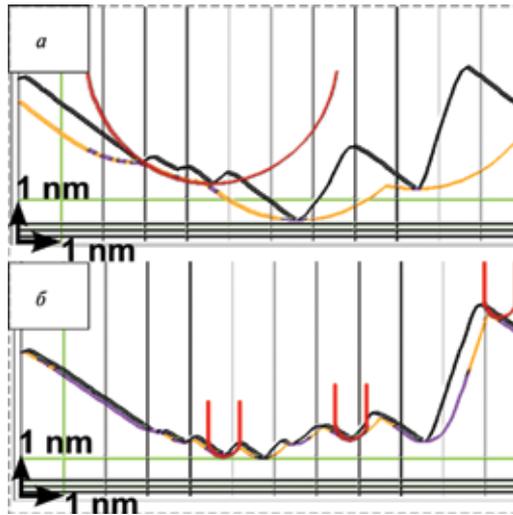


Рис. 3. Профили исходного (верхняя кривая), моделированного (нижняя кривая) рельефов и положение туннельных оболочек при сканировании: *а* — радиус закругления 3 нм; *б* — 0,6 мВ

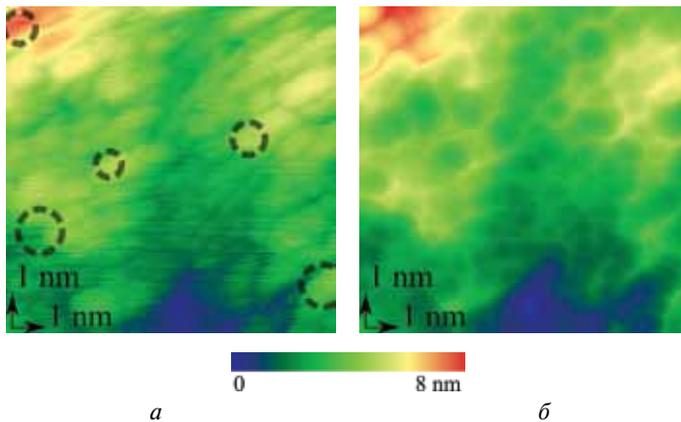


Рис. 4. Исходное (*а*) и восстановленное (*б*) изображения рельефа

де с помощью туннельного микроскопа НПО «Алмаз». В общей сложности было обработано около 200 изображений с пространственным разрешением от 0,2 до 1 нм и размером изображения от 128×128 до 512×512 точек.

Если проанализировать изменения в изображении рельефа, то видно, что имеет место расширение «впадин» и заострение «возвышенностей» рельефа, а также уменьшение уровня шумов. Учет формы и размеров острия иглы при интерпретации измерений приводит к тому, что преобразованное изображение очищается от различных шумов и артефактов, которые визуальным образом воспринимаются скорее как несуществующие объекты. Отсутствие таких объектов при учете геометрии острия иглы связано с тем, что их существование противоречит физическим принципам сканирования (рис. 4б).

Пунктиром выделены элементы исходного изображения, наличие которых связано с особенностями получения изображений в туннельной микроскопии

Использование комплекса позволило улучшить точность измерения формы и размеров малых нанобразований в несколько раз (с 1...2 до 0,4...0,5 нм), а также уточнить геометрию нанобразований размером в несколько десятков нанометров.

Технический уровень и новизна решения подтверждены патентом РФ. Способ подробно описан в статье [Карташев, 2010].

Литература

- [Карташев, 2010] *Карташев В. В., Карташев В. А.* Определение формы и размера острия иглы туннельного микроскопа // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 10. С. 7–10.
- [Миронов, 2004] *Миронов В. Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. М: Техносфера, 2004. 114 с.
- [Bukharaev, 1998] *Bukharaev A.* Three-dimensional probe and surface reconstruction for AFM using a deconvolution algorithm / Anastas Bukharaev, Nikolai Berdunov, Denis Ovchinnikov, Kev Salikhov // Scanning Microscopy. Chicago: AMF O'Hare. 1998. V. 12. N. 1.

TUNNELING MICROSCOPE AS A TECHNICAL VISION SYSTEM FOR RELIEF SURFACE VISUALIZATION

V. A. Kartashev, V. V. Kartashev

Keldysh Institute for Applied Mathematics, RAS (KIAM RAS)

Scanning tunneling microscope technical vision problems are discussed in the article. The method of probe visual information obtaining and distortions being induced are described. Processing technique, which raises the level of relief surface compliance with the scanning process physical conditions, is proposed. The software package implementing that technique is introduced and its working results are analyzed.

Keywords: tunneling microscope, probe microscopy, nanodiagnostics, scanning probe accounting, STM measurements analysis.

Kartashev Vladimir A. — professor, PhD, sr. research fellow, e-mail: kart@list.ru.

Kartashev Vsevolod V. — PhD, jr. research fellow, e-mail: vsevolod.kartashev@gmail.com.

Секция 5

ОБНАРУЖЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

ПОИСК ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИ ФОРМИРУЕМЫХ КОНТУРНЫХ ЭТАЛОНОВ

Ю. Б. Блохинов, А. С. Чернявский

*Федеральное государственное унитарное предприятие
«Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»
(ФГУП «ГосНИИАС»), Москва*

В статье рассматривается задача поиска объектов на аэрофотоснимках земных сцен, сделанных в различных спектральных диапазонах. Эталонные изображения искомым объектам представляют собой бинарные изображения контуров. Предлагается процедура сравнения эталона с текущим изображением, основанная на анализе полей градиентов яркости. Приводится процедура сравнения эталона с текущим изображением, основанная на анализе полей градиентов яркости и позволяющая использовать несколько изображений одной сцены для повышения устойчивости процедуры поиска к различным помехам. Обсуждается вопрос применения динамически формируемых контурных эталонов для решения задачи ориентирования.

Ключевые слова: поиск по эталону, сопоставление изображений, контурный эталон, поле градиентов.

Введение

Одним из перспективных направлений в совершенствовании систем навигации летательных аппаратов является использование технологий машинного зрения. При работе в этом направлении необходимо учитывать априорную информацию о сцене (типы и размеры объектов, их взаимное расположение), формулировать ее эталонное описание в виде некоторой структуры данных или в виде эталонного изображения (ЭИ). Во время полета эталонное изображение сравнивается с текущим изображением (ТИ), получаемым при помощи бортовых датчиков (камер) с целью обнаружения искомым объектов и уточнения их координат. Целью данной работы является разработка методов решения задачи поиска наземного объекта на ТИ по имеющемуся ЭИ. Предлагается функция сходства для сравнения эталонного изображения, заданного в виде контуров (ребер) с растровыми текущими изображениями, а также процедура, позволяющая использовать разноракурсные снимки одной сцены для увеличения устойчивости поиска к различным помехам.

1. ФУНКЦИЯ СХОДСТВА КОНТУРНОГО ЭТАЛОНА И ТЕКУЩЕГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Эталонное описание сцены содержит бинарные реберные (скелетные) изображения объектов. Яркость объектов не входит в эталонное описание, поскольку при его создании (трехмерной модели) достоверная информация о яркости и текстуре, как правило, недоступна. Кроме того, форма и расположение граней

Блохинов Юрий Борисович — начальник лаборатории, кандидат физико-математических наук.

Чернявский Алексей Станиславович — инженер, e-mail: achern@gosniias.ru.

объектов меньше всего варьируются при изменении условий съемки, в то время как яркостная составляющая ТИ может сильно меняться в зависимости от освещения, времени суток и времен года. Для каждого объекта, включенного в эталонное описание, область поиска на текущем изображении считается заданной. Текущее изображение представляет собой аэрофотоснимок местности, полученный в видимом или инфракрасном диапазоне. Считается, что заранее заданный контурный эталон представляет собой ребра объекта, видимого под тем же углом, что и искомые объекты на ТИ. Задача поиска заключается в уточнении координат (локализации) искомого объекта.

На рис. 1а, б приведены примеры текущих изображений, представляющие собой снимки наземного сооружения, сделанные в инфракрасном и видимом диапазонах, а на рис. 1в — его контурный эталон (КЭ). Для нахождения наиболее вероятного положения объекта на текущем снимке вычисляется функция сходства контурного эталона и ТИ. Алгоритм нахождения функции сходства основан на поиске минимума разности направлений градиентов яркости на текущем изображении и эталоне. Поскольку направление градиента яркости — более инвариантная характеристика, чем сама яркость, метод позволяет сравнивать изображения, полученные при разных условиях освещения, в разное время и в разных диапазонах [Haber, Modersitzki, 2006]. В данной статье используется модификация алгоритма, в которой в качестве расстояния между эталоном и исходным изображением в каждом пикселе считается величина угла α между направлением градиента на исходном снимке и нормалью к контуру на контурном эталоне.

Для вычисления функции сходства методом разности направлений к изображению контурного эталона применяется фильтр Гаусса. Это делается для того, чтобы, «размазав» эталон, снизить эффект его малой площади (предполагается, что изначально контур КЭ имеет ширину в один пиксель) и вычислять меру сходства эталона и фрагмента ТИ по большей части текущего изображения. Затем в каждой ненулевой точке сглаженного эталона находится направление градиента яркости:

$$R_E(i, j) = \arctg \left(\frac{E_y}{E_x} \right), \quad (1)$$

где $E(i, j)$ — изображение контурного эталона. Та же процедура проводится и для ТИ, в результате чего получаем массив значений $R_I(i, j)$. Для того, чтобы внутренние и внешние нормали к контуру вносили одинаковый вклад в итоговую функцию сходства, к отрицательным величинам $R_E(i, j)$ и $R_I(i, j)$ добавляется число π . В результате все направления градиентов и нормалей принадлежат интервалу $[0, \pi]$.

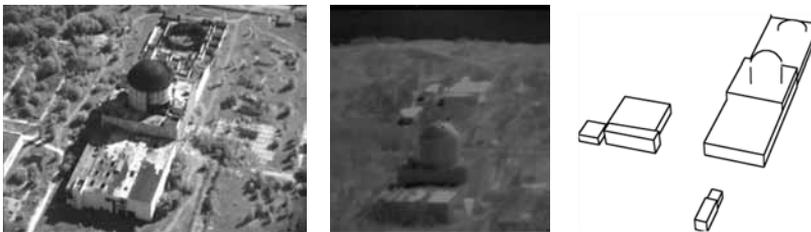


Рис. 1. Примеры текущих изображений и контурного эталона

Для ускорения вычислений значения направлений квантуются, используется шесть равных ячеек от $[0, \pi/6)$ до $[5\pi/6, \pi)$. Для нахождения функции сходства между эталоном и ТИ верхний левый угол двумерного массива $R_E(i, j)$, содержащего поле направлений градиента эталона, переносится в позицию (m, n) в системе координат ТИ и накладывается на массив $R_I(i, j)$, содержащий поле направлений градиентов ТИ. В каждой точке, принадлежащей контурному эталону, вычисляется величина

$$p(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } |\text{bin}(R_I(i, j)) - \text{bin}(R_E(i, j))| < T, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2)$$

где $\text{bin}(R_I(i, j))$ — номер ячейки, в которой лежит направление градиента текущего изображения в точке (i, j) ; T — значение порога на разность ячеек. Итоговая функция сходства равна сумме функций сходства, посчитанных во всех пикселях эталона:

$$D(m, n) = \sum_{i \in [m, m+H_E], j \in [n, n+W_E]} p(i, j), \quad (3)$$

где H_E и W_E — высота и ширина эталонного изображения. В данной статье используется значение порога $T = 2$. При использовании метода направлений градиентов яркости функция сходства считается во всех точках, где сглаженное изображение эталонного контура не равно нулю. Из рассмотрения исключаются лишь те точки, в которых амплитуда градиента мала, что соответствует однородным участкам изображения. Порог для формирования маски пикселей, входящих в выражение (3), зависит от диапазона яркости.

Поскольку при подсчете выражения (3) пространственное расположение пикселей внутри эталона не учитывается, функция сходства может иметь ложные локальные максимумы. Эталон дает хороший отклик на тех участках ТИ, в которых присутствуют контуры схожего с эталоном направления. В частности, для дорог, длинных стен и крыш функция сходства имеет ряд протяженных линейных «гребней», где сосредоточены локальные максимумы. Для более точного нахождения положения объектов обычно используется априорная информация о взаимном расположении объектов, позволяющая отсеять ложные максимумы функции сходства [Блохинов и др., 2011; Гнилицкий и др., 2010]. Функция сходства контурных (бинарных) эталонов и растровых текущих изображений была успешно применена в указанных работах. В них было показано, что метод поиска объектов по контурному эталону с использованием функции сходства, основанной на сравнении полей градиентов яркости ТИ и нормалей к контурному эталону, проявляет устойчивость к нормально-распределенному шуму с $\sigma \leq 25$ (при динамическом диапазоне яркости от 0 до 255), к импульсному шуму «соль-перец» с $p \leq 0,7$ и, в определенной степени, к загораживанию сцен облаками. В следующем разделе предлагается дальнейшее усовершенствование процедуры поиска, основанное на использовании информации с нескольких снимков одной трехмерной сцены, сделанных с разных ракурсов.

2. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ДАННЫХ РАЗНОРАКУРСНОЙ СЪЕМКИ

Во время полета к цели возможна ситуация, в которой в поле зрения попадает не целиком искомый объект, а лишь какой-то его фрагмент. В этом случае, особенно

при наличии шума и больших ошибках ориентирования (как следствие, большом размере области поиска объекта) возможны ложные максимумы функции сходства, поскольку посторонние объекты на снимке могут давать больший отклик, чем фрагмент искомого объекта. Улучшение локализации объекта может быть достигнуто путем «склеивания» функций сходства искомого объекта по нескольким снимкам, сделанным последовательно в небольшом временном интервале с разных ракурсов, в одну функцию сходства. Опишем алгоритм улучшенной локализации по N снимкам одной сцены.

В первую очередь для каждого изображения необходимо найти функцию сходства всех объектов, для которых имеется эталонное описание (контурный эталон). Затем функция сходства, определенная в двумерной пиксельной системе координат, трактуется как «голос» в пользу гипотезы о том или ином расположении объекта в трехмерной геодезической системе координат. Пусть размер области поиска искомого объекта на изображении с номером i равен $W_i \times H_i$ пикселей. Каждая координата (x, y) двумерного прямоугольного массива размером $W_i \times H_i$, в котором хранится функция сходства, соответствует сдвигу некоторой точки объекта в трехмерной геодезической системе координат относительно ее истинного положения, в свою очередь, приближенно вычисленного на основе информации об ориентировании. В качестве характерной точки объекта можно выбрать как геометрическую особенность здания (угол крыши, вершину купола, середину окна), так и искусственно введенную точку, например, центр масс объекта. Если функция сходства в точке с пиксельными координатами (x, y) равна $f(x, y)$, то можно говорить о том, что гипотеза о расположении центра масс объекта в точке с геодезическими координатами (x_0, y_0, z_0) получает «голос», равный f .

Выполнив описанные шаги для всех K изображений, по которым проводится сборка сцены, получим K массивов голосов, отданных за то или иное расположение центра объекта *на местности*, а не в пространстве каждого отдельного изображения. Таким образом, все функции сходства *комплексуются*, то есть становится возможным сравнить голоса, полученные за гипотезу о расположении центра масс путем анализа одного изображения, с голосами, полученными при анализе другого изображения. Для тех точек трехмерного пространства, за которые голосует только один снимок, берется одно значение функции сходства. Если же за какую-либо область пространства голосуют несколько снимков, то проводится сравнение: если i -е изображение голосует за точку (x_0, y_0, z_0) или ее ближайшую окрестность величиной f_i , а j -е изображение голосует за точку (x_0, y_0, z_0) величиной f_j , причем f_j превосходит f_i (например, в силу того, что на j -м кадре искомый объект занимает 80 % площади снимка, а на i -м всего 25 %), то из двух функций сходства берется максимум. В завершение процедуры сборки сцены по нескольким изображениям находится точка в трехмерном пространстве, получившая максимальный голос. Считается, что центр масс объекта лежит в этой точке в геодезической системе координат. Применяя данные ориентирования, можно вычислить соответствующее положение контурного эталона объекта в пиксельных координатах всех снимков, использовавшихся для сборки сцены.

На рис. 2а–в представлены исходные изображения — снимки наземного оружия, полученные в инфракрасном диапазоне. Снимки искусственно зашумлены нормально-распределенным шумом с $\sigma = 20$. На рис. 2г–е показаны функции сходства для каждого из снимков в отдельности, отображенные в пик-

сельной системе координат (ПСК). Ширина и высота области поиска контурного эталона на изображениях равна 101 пикселу (50 пикселов в каждую сторону от истинного положения объекта, известного из данных целеуказания). На рис. 3 отображены три области — уже в геодезической (ГСК) системе координат, в пределах которых ведется поиск объекта по каждому снимку. Размер области поиска на местности составляет примерно 65 м по оси Ox и 13 м по оси Oy . Из рис. 2—*e* видно, что максимум функции сходства достигается примерно в одной и той же точке, однако наряду с максимумом присутствуют ложные локальные максимумы, вызванные наличием шума.

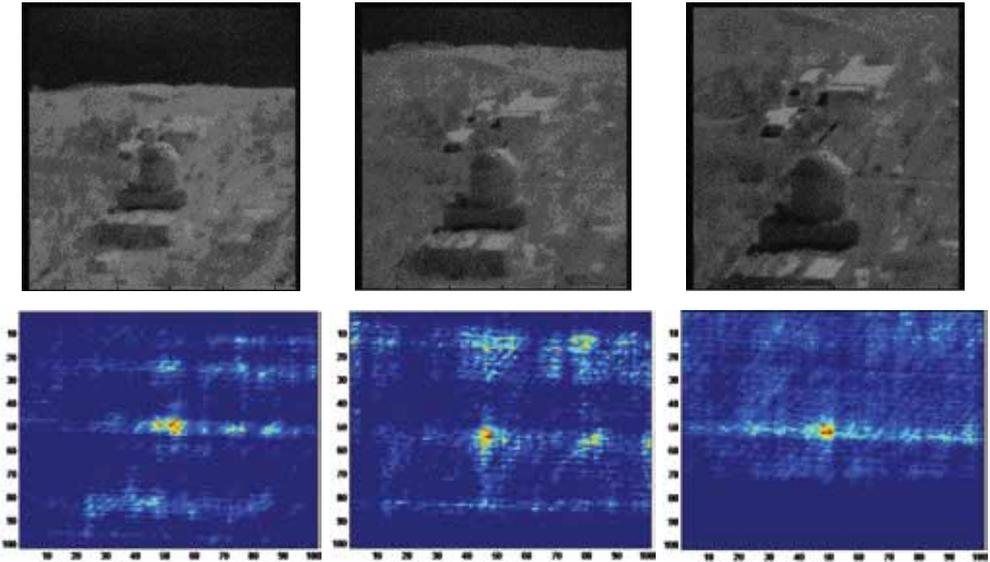


Рис. 2. Фрагменты зашумленных ИК-снимков наземного сооружения и функция сходства контурного эталона объекта по каждому из снимков

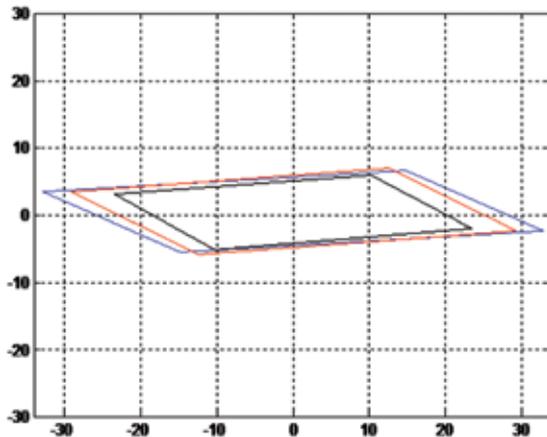


Рис. 3. Области поиска на местности (в ГСК), соответствующие областям поиска контурного эталона по снимкам, показанным на рис. 2

Отметим, что на всех снимках присутствуют лишь некоторые небольшие части зданий, использованных в эксперименте, что также влияет на точность локализации объекта по отдельным снимкам.

На рис. 4 отображена итоговая функция сходства, собранная путем «склейки» в ГСК функций сходства, полученных по каждому отдельному снимку (интерполяция значений функций сходства при переходе из ПСК в ГСК выполнена по методу ближайших соседей). Видно, что максимум итоговой функции сходства гораздо более выраженный: ложные локальные максимумы подавлены.

На рис. 5 отображен контурный эталон наземного сооружения, наложенный на исходные изображения в координатах, найденных при помощи сборки сцены по трем снимкам.

Из результатов экспериментов можно сделать вывод о возможности и целесообразности комплексирования функций сходства нескольких снимков одной сцены, сделанных в последовательные моменты времени с разных точек, для более точной локализации объекта, особенно в условиях шумов и ограниченной видимости. Применение нескольких кадров для построения одной функции сходства позволяет снизить влияние шума, а также дает возможность работать со снимками, на которых большая часть искомого объекта выходит за пределы кадра.

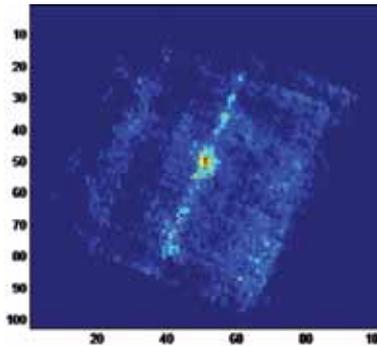


Рис. 4. Итоговая функция сходства контурного эталона наземного сооружения, найденная по трем последовательным ИК-снимкам



Рис. 5. Контурный эталон наземного сооружения, наложенный на ТИ, в положении, найденном путем анализа трех последовательных ИК-снимков

3. ПРИМЕНЕНИЕ КОНТУРНЫХ ЭТАЛОНОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОРИЕНТИРОВАНИЯ

В предыдущих разделах процедура сравнения контурного эталона и текущего изображения рассматривалась в контексте решения задачи обнаружения искомого объекта и уточнения его положения в системе координат изображения. В то же время представляет интерес использование контурных эталонов для решения задачи ориентирования. Под задачей ориентирования здесь понимается уточнение навигационных данных (три угла ориентирования $\{\omega, \varphi, \kappa\}$ и три координаты $\{x, y, z\}$) летательного аппарата, с которого было получено текущее изображение. Пусть с ЛА наблюдается сцена, состоящая из одного и более объектов, трехмерные модели которых известны заранее. Каждому набору параметров ориентирования соответствует один набор контурных эталонов, на которых изображены видимые ребра объектов сцены, как они видны с заданной точки в трехмерном пространстве и под заданным углом. Задача ориентирования заключается в нахождении уточненного набора параметров, при котором функция сходства (3) будет принимать максимальное значение, т. е. контурный эталон будет наиболее точно соответствовать трехмерной сцене.

Поскольку трехмерная модель сцены известна, становится возможным динамически (в полете) генерировать контурные эталоны объектов сцены для любых параметров ориентирования. Для этого требуется провести ряд вычислений, связанных с нахождением проекций трехмерных точек и прямых, и с отсечением невидимых граней. Поскольку вычисление градиента функции (3) представляет проблемы (аналитической производной не существует), то максимизация функции (3) должна выполняться методами оптимизации, не требующими вычисления градиента, такими как рой частиц или метод Нелдера – Мида.

Заключение

Представленный алгоритм позволяет проводить быстрый поиск объектов по контурному эталону. Алгоритм устойчив к разным видам шума и был успешно применен к изображениям, полученным в инфракрасном диапазоне. Применение нескольких снимков для построения одной функции сходства (комплексирование) позволяет снизить влияние шума, а также дает возможность работать со снимками, на которых большая часть искомого объекта выходит за пределы кадра.

Литература

- [Блохинов и др., 2011] Блохинов Ю. Б., Гнилицкий В. В., Инсаров В. В., Чернявский А. С. Алгоритм анализа и принятия решения в задаче селекции объектов на изображениях наземных сцен // Технич. зрение в системах управления мобильными объектами-2010: Тр. научно-техн. конф.-семинара. Вып. 4 / Под ред. Р. Р. Назирова. М.: КДУ, 2011. С. 92–108.
- [Гнилицкий и др., 2010] Гнилицкий В. В., Инсаров В. В., Чернявский А. С. Алгоритмы принятия решения в задаче селекции объектов на изображениях наземных сцен // Изв. Акад. наук. ТиСУ. 2010. № 6. С. 143–151.
- [Haber, Modersitzki, 2006] Haber E., Modersitzki J. Intensity gradient based registration and fusion of multi-modal images // Intern. Conf. on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. 2006. V. 9. P. 726–733.

**THE SEARCH FOR THREE-DIMENSIONAL OBJECTS IN IMAGES
BASED ON DYNAMICALLY GENERATED CONTOUR TEMPLATES**

Yu. B. Blokhinov, A. S. Chernyavskiy

State Research Institute of Aviation Systems (“GosNIAS”), Moscow

The subject of the paper is object search on aerial photographs made in various spectral ranges. Templates of objects to be sought are represented as binary images containing the objects' contours. A procedure for comparing the template and reference image is proposed, which is based on the analysis of gradient of the image brightness. This procedure allows using several images of the same scene in order to enhance the robustness of the search with respect to various kinds of noise. The possibility of using contour-based templates, which can be generated dynamically, is discussed with respect to the problem of orientation recovery.

Keywords: template-based search, image matching, contour model, gradient direction field.

Blokhinov Yuri Borisovich — head of the laboratory, PhD.

Chernyavskiy Alexey Stanislavovich — engineer, e-mail: achern@gosniias.ru.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЫ НА ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯХ

Д. В. Комаров, Ю. В. Визильтер, О. В. Выголов

ФГУП «ГосНИИ Авиационных систем» (ФГУП «ГосНИИАС»), Москва

Статья посвящена разработке алгоритма автоматического обнаружения взлетно-посадочной полосы (ВПП) на видеоизображениях. Алгоритм предназначен для информационной поддержки авиационной системы «улучшенного видения» (СУВ). Описаны логика работы и основные процедуры алгоритма. Приведены результаты тестирования алгоритма и направления дальнейших работ по его совершенствованию.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-08-01114-а).

Ключевые слова: обнаружение взлетно-посадочной полосы, преобразование Хафа, авиационные системы улучшенного видения, интегрированная модульная авионики.

Введение

В статье предложен алгоритм автоматического обнаружения ВПП на видеоизображениях, предназначенный для информационной поддержки авиационной системы улучшенного видения (СУВ). В текущей версии алгоритм способен решать задачу обнаружения ВПП:

- при отработке на модельных видеопоследовательностях телевизионного (ТВ) диапазона, формируемых наземным демонстрационным комплексом при помощи графической моделирующей системы (симулятора);
- автоматически в реальном времени на базе вычислителя (крейта) интегрированной модульной авионики (ИМА) производства ОАО «НКБ ВС» (Таганрог);
- без опоры на текущую пилотажно-навигационную информацию и априорные картографические сведения об аэродроме и ВПП.

Реализующая алгоритм процедура обработки видеоданных вызывается на каждом кадре видеопоследовательности служебным программным обеспечением (ПО) крейта ИМА и принимает на вход цифровое изображение закабинной обстановки, формируя на выходе флаг наличия/отсутствия ВПП в поле зрения, а также (в случае наличия ВПП) координаты объемлющего четырехугольника ВПП.

1. ЛОГИКА РАБОТЫ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ ВПП

Обнаружение ВПП осуществляется автоматически на максимально возможной дальности. При этом в силу низкого разрешения фрагмента изображения, содержащего ВПП, достоверным считается лишь общее положение полосы (на-

Комаров Денис Валерьевич — инженер, e-mail: mrkomar@mail.ru.

Визильтер Юрий Валентинович — начальник лаборатории компьютерного машинного зрения, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: viz@gosniias.ru.

Выголов Олег Вячеславович — начальник сектора, кандидат технических наук, e-mail: o.vygolov@gosniias.ru.

правление на неё). По мере приближения к полосе осуществляется слежение и постоянное уточнение ее места положения. При этом наиболее достоверной представляется оценка продольных границ ВПП. При приближении на достаточное расстояние для обнаружения стандартного маркера начала полосы, видимые координаты всех углов полосы окончательно уточняются и визуализируются. Слежение за положением ВПП и соответствующее графическое отображение выделенного объекта прекращаются после перехода от этапа захода на посадку к собственно посадке. Этот момент определяется по факту приближения на определенную величину видимого положения маркера начала полосы на её изображении к нижнему краю кадра.

В следующих разделах рассмотрены основные процедуры алгоритма.

2. ПОИСК ЛИНИИ ГОРИЗОНТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗЕМЛИ И НЕБА

Обнаружение линии горизонта основано на преобразовании Хафа [Hough, 1962]. Линии горизонта всегда соответствует локальный максимум в аккумуляторе Хафа модуля градиента яркости типового модельного изображения. Поскольку при определенных углах визирования этот максимум может оказаться не глобальным, для обеспечения надёжности обнаружения используется структурный признак, основанный на том, что от линии горизонта со стороны «неба» градиенты яркости выражены слабее по сравнению со значениями от той же линии (со стороны «земли»). Таким образом, в аккумуляторе Хафа с одной стороны от локального максимума должно быть существенно меньше голосов контурных точек, чем с противоположной (рис. 1, суммирование вдоль стрелок). Для вычисления модуля градиента яркости используется оператор Собела [Гонсалес, Вудс, 2005].

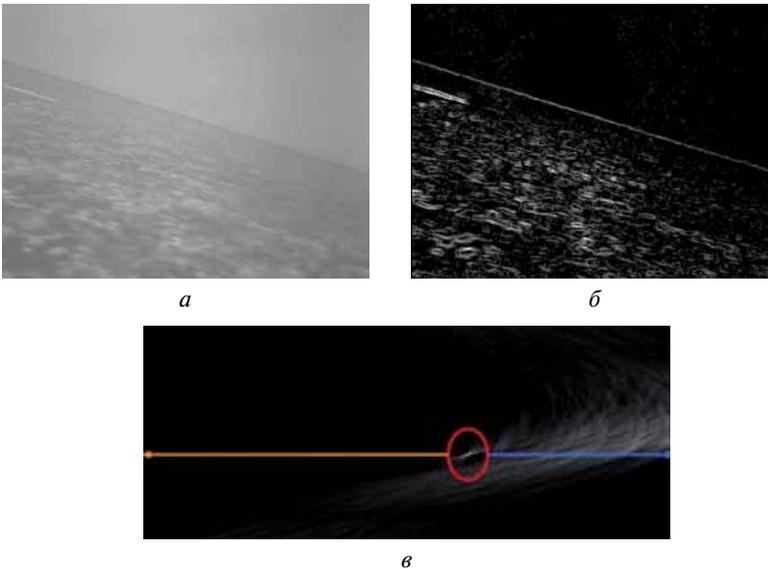


Рис. 1. *a* — типовое модельное изображение; *б* — модуль градиента яркости изображения *a*; *в* — изображение аккумулятора Хафа

Дальнейшая обработка ведется по областям изображения, привязанным к линии горизонта, что позволяет исключить области заведомо не содержащие ВПП.

3. ПРОВЕРКА НАЛИЧИЯ МАРКЕРА НАЧАЛА ВПП

Визуальные свойства изображения сильно изменяются в зависимости от дальности до ВПП. В связи с этим алгоритмы её обнаружения вдали и вблизи имеют различную логику. Переключение из исходного режима «обнаружения на удалении» в режим «обнаружения вблизи» происходит по сигналу об обнаружении маркера начала ВПП (рис. 2а).

Обнаружение маркера основано на поиске глобального максимума, превышающего пороговое значение в горизонтальной проекции яркости вида (1), вычисленной для карты горизонтальных градиентов фрагмента исходного изображения, содержащего ВПП (рис. 2б):

$$\text{Proj}_Y[y] = \sum_{x=0}^{\text{Dim}X-1} \text{Im}[x, y], \quad y = 0 \dots \text{Dim}Y - 1, \quad (1)$$

где $\text{Im}[x, y]$ — яркость изображения в точке (x, y) , $\text{Dim}X$, $\text{Dim}Y$ — ширина и высота изображения, $\text{Proj}_Y[y]$ — значение проекции яркости для строки Y .

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ГРАНИЦ ВПП

На этом этапе применяется оригинальное ортонормальное преобразование Хафа (ОПХ). Оно заключается в проецировании контуров изображения на предполагаемую горизонтальную плоскость в объектном пространстве (плоскость ВПП) и сборе их проекций на различные возможные направления в этой плоскости (рис. 3) с учетом направлений градиентов.

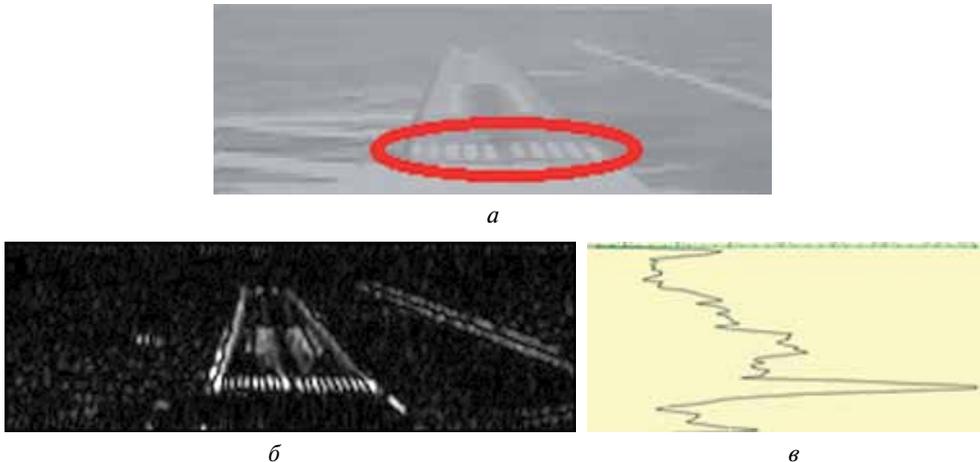


Рис. 2. а — пример изображения с маркером начала ВПП (выделен красным цветом); б — карта горизонтальных градиентов а; в — горизонтальная проекция яркости б. Положение глобального максимума проекции в соответствует положению маркера начала ВПП

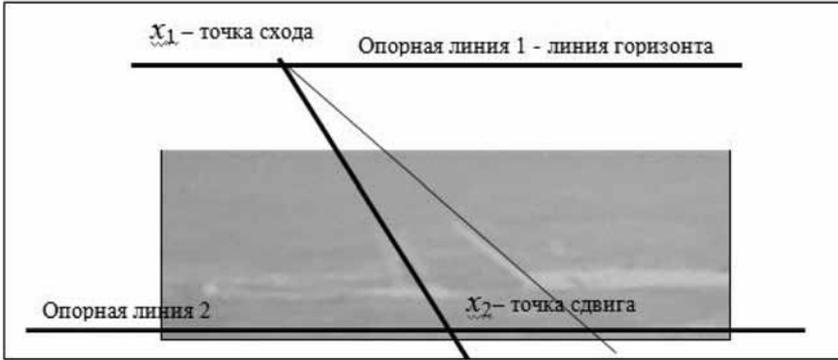


Рис. 3. Параметризация ортонормального преобразования Хафа (x_1, x_2)

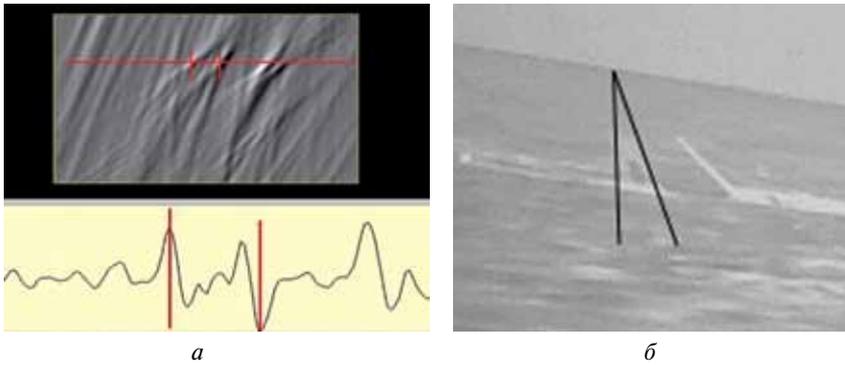


Рис. 4. *a* — построчно дифференцированный аккумулятор ОПХ (вверху) и его горизонтальный профиль яркости (строки), содержащий наиболее симметричные локальные экстремумы максимальной амплитуды (внизу); *б* — соответствующие экстремумам левая и правая границы ВПП

Предполагается, что продольные линии контуров ВПП «сходятся» в точке, близкой к наблюдаемой линии горизонта. Тогда вращение средней линии ВПП в плоскости полосы соответствует перемещению точки схода вдоль линии горизонта, а сдвиг средней линии влево или вправо соответствует сдвигу точки пересечения видимой проекции этой линии и нижнего края анализируемого фрагмента.

Поиск продольных границ ВПП сводится к поиску в построчно дифференцированном аккумуляторе ОПХ горизонтального профиля яркости (строки), содержащей наиболее симметричные локальные экстремумы максимальной амплитуды. Координата профиля соответствует координате точки схода на линии горизонта, а положение максимумов в строке — левой и правой границам ВПП (рис. 4)

4. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛОЖЕНИЯ ВПП

Для повышения надежности обнаружения ВПП выполняется пространственно-временная фильтрация параметров положения ВПП. По сути, используется

авторегрессионная фильтрация параметров положения ВПП с учетом пространственного положения объекта и разрешения кадра [Визильтер, Вишняков, 2008]. Фильтруются следующие параметры положения ВПП: координата точки схода (точка схода всегда принадлежит линии горизонта); расстояние от конца ВПП до линии горизонта; расстояние от начала ВПП до линии горизонта; угол между вертикалью и средней линией ВПП; угол раствора между левой и правой границами ВПП.

В случае сбоя алгоритма на первичном этапе обнаружения используется аппроксимация положения ВПП на основе текущих оценок параметров геометрической модели.

Заключение

Предложенный алгоритм обнаружения ВПП реализован в виде программного модуля реального времени для прототипа авиационной СУВ на базе платформы ИМА. Тестирование модуля осуществлялось на модельных видеопоследовательностях ТВ диапазона. Тестирование показало принципиальную работоспособность алгоритма и возможность обработки видеосигнала на вычислителе ИМА в реальном времени.

Дальнейшие работы по совершенствованию алгоритма обнаружения ВПП будут направлены на адаптацию алгоритма к реальным изображениям полосы в инфракрасном диапазоне. Кроме того, вероятность правильного обнаружения ВПП в сложных случаях может быть существенно повышена за счет использования дополнительной информации — текущей пилотажно-навигационной информации, а также априорных сведений об аэродроме и структуре расположения полосы в аэродромном комплексе.

Литература

- [Визильтер, Вишняков, 2008] *Визильтер Ю. В., Вишняков Б. В.* Исследование поведения авторегрессионных фильтров в задаче выделения и анализа движения на цифровых видеопоследовательностях // Вестн. компьютерных и информац. технологий. 2008. № 8. С. 2–8.
- [Гонсалес, Вудс, 2005] *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
- [Hough, 1962] *Hough P. V. C.* Methods and Means for Recognizing Complex Patterns. U. S. Patent 3069654, 1962.

ALGORITHM FOR AUTOMATIC RUNWAY DETECTION ON VIDEO SEQUENCES

D. V. Komarov, O. V. Vygolov, Yu. V. Vizilter
FGUP "State Research Institute of Aviation Systems"
(FGUP "GosNIIAS"), Moscow

The paper describes proposed algorithm for automatic runway detection on video sequences. The algorithm is intended for informational support of enhanced vision

systems (EVS) for aviation. The logic and main procedures of the algorithm are represented. In conclusion, the algorithm testing results and directions for further work are represented.

This project is supported by RFBR (N. 11-08-01114-a).

Keywords: runway detection, Hough transform, enhanced vision systems for aviation, integrated modular avionics.

Komarov Denis Valeryevich — engineer, e-mail: mrkomap@mail.ru.

Vygolov Oleg Vyacheslavovich — head of group, PhD, e-mail: o.vygolov@gosniias.ru.

Vizilter Yuriy Valentinovich — head of laboratory for computer and machine vision, doctor of sciences, e-mail: viz@gosniias.ru.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

А. Н. Липатов¹, А. Н. Ляш¹, В. С. Макаров¹, С. А. Антоненко²,
Г. В. Захаркин²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва
² ЗАО СП «Интерастро», Москва

Необходимый элемент управления процессом посадки и стыковки подвижного объекта — устройство определения его текущих координат. В статье представлен оптический датчик координат — устройство, предназначенное для координатных измерений положения объекта относительно неподвижных маркеров, расположенных на посадочной плоскости. Отличительная особенность датчика в том, что он предназначен для работы в водной среде. В процессе посадки используется активная подсветка топографической мишени. В статье рассматриваются особенности аппаратной и программной реализации датчика координат как системы технического зрения.

Ключевые слова: оптический сенсор, техническое зрение, топографическая мишень, автоматическая посадка.

Введение

На протяжении ряда лет в ИКИ РАН ведутся работы теоретического и экспериментального характера по разработке систем управления движением объектов для работы в различных средах. Важнейшим элементом систем управления движения служат устройства, обеспечивающие координатные измерения положения объекта, работающие в режиме реального времени. Такие устройства могут быть созданы на основе использования систем технического зрения. Один из примеров работы, доведенной до штатного образца, — система автоматической посадки и стыковки глубоководного аппарата. Она предназначена для замены крайне трудоемкого и напряженного режима ручного управления движением многотонного глубоководного аппарата при посадке и стыковке. Система позволяет упростить и ускорить процесс, обеспечивая позиционирование с точностью до нескольких миллиметров. Это особенно важно в условиях внешних возмущений и критических углах взаимной ориентации объектов.

В данной статье представлен оптический датчик координат, как элемент технического зрения, обеспечивающий систему автоматической посадки координатными измерениями в режиме реального времени. Разработанное в ИКИ РАН устройство — оптический датчик координат представляет собой сложный аппаратно-программный комплекс, предназначенный для координатных измерений положения объекта относительно неподвижных маркеров, расположенных на посадочной плоскости.

Липатов Александр Николаевич — ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: slip@iki.rssi.ru.

Ляш Андрей Николаевич — научный сотрудник, e-mail: alyash@iki.rssi.ru.

Макаров Владислав Сергеевич — ведущий специалист, e-mail: vmakarov@mx.iki.rssi.ru.

Антоненко Сергей Анатольевич — ведущий специалист, e-mail: eslab@mail.ru.

Захаркин Геннадий Владимирович — ведущий специалист, e-mail: eslab@mail.ru.

Процесс проведения координатных измерений выглядит достаточно просто. При приближении подвижного объекта к зоне посадки и стыковки в освещенное поле зрения системы попадает топографическая мишень — геометрическая фигура, образованная светоотражающими маркерами — расположенная в плоскости посадки. Отраженный сигнал от маркеров формирует изображение в оптическом датчике, где оно обрабатывается с целью распознавания и выделения маркеров на фоне засветки и помех. В приборной системе координат вычисляются координаты центров маркеров по изображению топографической мишени. Данные передаются в вычислительное устройство, управляющее процессом посадки. Так как размеры геометрической фигуры известны с высокой точностью, то можно вычислить дальность и углы взаимной ориентации осей топографической мишени и осей подвижного объекта. Общая схема комплекса представлена на рис. 1. Существенным требованием, предъявляемым к системе, считается высокая точность определения координат и высокая частота выдачи информации 10...12 Гц.

Создание подобного устройства потребовало большого объема исследований по изучению работы оптических систем в условиях водной среды. Разработка программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего координатные измерения системы посадки, предварялись теоретическими расчетами, моделированием и натурными экспериментами по выбору оптимальных алгоритмов и надежных аппаратных средств.

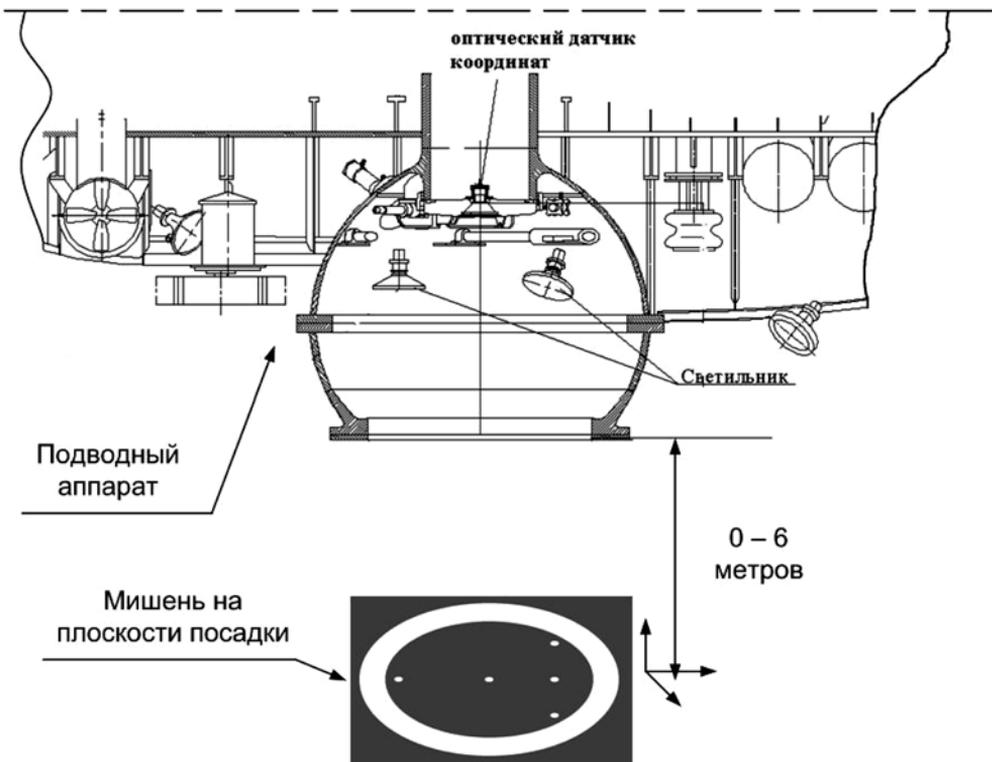


Рис. 1. Схематическое изображение системы автоматической посадки

В начальную задачу создания программно-алгоритмического обеспечения технического зрения входили работы по выбору:

- геометрической фигуры и объектов (маркеров) её составляющих;
- алгоритмов обнаружения и распознавания объектов в реальном времени;
- алгоритмов сопровождения объектов в реальном времени;
- алгоритмов фильтрации изображения в условиях ограниченной видимости, наличия искажений и помех.

Далее осуществлялось наращивание уровня развития алгоритмов в части:

- учета влияния динамики движения мобильного объекта;
- обеспечения устойчивости алгоритмов анализа изображения при яркостно-геометрической изменчивости объектов;
- взаимодействия системы технического зрения с системами управления.

Алгоритмы обработки, возможности по их наращиванию, неразрывно связаны с техническими требованиями аппаратной реализации системы и естественными физическими ограничениями.

АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ

В состав аппаратных средств системы технического зрения входят оптический датчик, система освещения, топографическая мишень и вычислительные устройства. Главная задача аппаратной части системы заключается в обеспечении качественного изображения топографической мишени. Получаемое в водной среде, оно характеризуется дальностью видимости отражающих объектов [Соколов, 1974]. При разработке учитывались основные факторы, которые влияют на качество изображения:

- гидрооптические характеристики среды, такие как коэффициент преломления среды, спектральное поглощение и рассеяние, мутность и др.;
- размеры и отражательные способности объектов (маркеров)
- взаимное геометрическое расположение топографической мишени, светильников и камеры;
- фон, на котором наблюдаются объекты;
- контрастная чувствительность приемного устройства;
- энергетические характеристики осветительной установки.

Влияние этих взаимосвязанных факторов анализировалось и проверялось экспериментально, на различных модификациях системы технического зрения. Основные технические характеристики системы и ряд экспериментальных результатов были представлены в работах А. Н. Липатова и др. [Липатов и др., 2009].

Гидрооптические свойства среды принципиально ограничивают дальность действия системы. Однако детальный анализ данных по оптическим свойствам вод различных морей показал, что при разумных требованиях к видимости мишеней дистанция действия системы составляет два десятка метров для глубоководных океанических вод, и 3...4 м для мутных прибрежных вод.

Разработка отражательных маркеров требует учета не только оптических свойств поверхности, но и фактора стойкости к агрессивной морской воде

и обрастанию органикой. Контрастная чувствительность камеры определяется типом матрицы и частотно-контрастной функцией передачи объектива. Объектив в большой степени определяет требования и к энергетическим характеристикам системы освещения. Был специально разработан и изготовлен в СПбГУ ИТМО объектив «Гидроруссар-СП», продолживший линейку объективов Гидроруссар для подводной съёмки, конструкции М. М. Русинова. Объектив обеспечивает необходимую светосилу, разрешение и позволяет компенсировать геометрические искажения простыми методами.

Следует отметить, что наблюдаемые маркеры всегда видны на уровне некоторого ненулевого фона определяемого дымкой рассеяния света в водной среде. Для минимизации этого фона используется система оптимальной спектральной фильтрации излучения осветителей. Продолжаются исследования по возможности замены осветительной системы на более качественную, основанную на узконаправленных спектрально селективных полупроводниковых излучателях.

Одна из важных особенностей аппаратного обеспечения заключается в том, что оптический датчик оснащен сигнальным процессором, и обработка изображения происходит в самом датчике. На вычислительное устройство передаются только координаты изображения маркеров и прореженное изображение для визуального контроля процесса посадки. Датчик координат работает автономно, не перегружая вычислительные мощности системы управления посадки, тем самым, повышая её надежность.

Другая особенность оптического датчика в том, что в процессе поиска и анализа изображения, автоматически подбираются оптимальное время экспозиции кадра и коэффициент усиления по внутренним алгоритмам, связанным с максимальной помехоустойчивостью. Любопытно, что изображение сцены, передаваемое для визуализации на экран монитора, не соответствует оптимальному восприятию человеческим глазом и требует дополнительной гаммакоррекции, балансировки контрастности и яркости.

ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Основой разработки алгоритмов технического зрения считается аналитическая формализация, без которой не может быть решена многопараметрическая задача выделения и распознавания объектов. Сегментация — один из важных методов, используемых на ранней стадии распознавания образов. Она необходима для разделения видимого изображения на составляющие части или объекты и определяет основные элементы работы автоматизированной системы. Именно на этой стадии обработки объекты выделяются для дальнейшего распознавания и анализа [Анисимов, 1983]. Алгоритмы сегментации основаны в основном на двух принципах: разрывности и подобии. В нашем случае мы старались оптимально использовать оба принципа. Выбранная фигура изначально представляла собой группу подобных объектов (маркеров), разнесенных относительно друг друга. Метод подобия повышает надежность динамического выбора уровня порога. Он пригоден как для статических, так и для динамических (меняющихся во времени) изображений. Для сегментации необходимо задаться набором дескрипторов, которые полностью идентифицирует объекты одного определенного класса. При этом важно выбирать дескрипторы, мало зависящие от размеров объекта, его ориентации и расположения.

Применение различного типа дескрипторов нужно там, где объекты различаются настолько, что для их идентификации недостаточно одного или нескольких основных типов. В нашем случае эту проблему можно было обойти и, потому для упрощения решения задачи использовались простые дескрипторы. Моделирование показало возможность использовать один тип дескриптора — эллипс (в вырожденном виде круг) с различными параметрами полуосей и величины площади.

Параметры эллипса постоянно меняются в связи с движением объекта и наблюдением под различными углами зрения, поэтому идентификация обеспечивается методом, в основе которого лежит подобие всех эллипсов, видимых на изображении. Независимо от угла и дальности до дескрипторов, все они должны обладать свойством подобия друг другу, что позволяет их идентифицировать. Большая и малая оси эллипса полезны для предварительного определения ориентации объекта. Отношение длин этих осей, называемое эксцентриситетом, также является важным параметром для описания формы образа.

Одного критерия подобия недостаточно для высокой достоверности решения задачи. Поэтому, для повышения вероятности идентификации, дескрипторы объединялись в одну фигуру с заранее строго определенной геометрией. Количество объектов (маркеров) в фигуре мишени было специально увеличено по отношению к минимально-необходимой величине для расчета дальности и углов. Это связано с тем, что некоторые объекты не могут быть идентифицированы по какой либо причине. Набор различных фигур с размерностью $N - 2$, составленных из основной фигуры с N элементами, в конечном счете, и должен быть распознан. На основе распознанных фигур на изображении достигается полная пространственная привязка системы координат камеры к объекту сближения.

Возможности технического зрения определяются способностью алгоритма выделять из изображения главную информацию при различных условиях наблюдения, с использованием априорных данных о параметрах объектов. Такие алгоритмы по ряду причин (неравномерное освещение; замутнение среды; наличие тел, загораживающих объекты; геометрия наблюдения) трудоемки. К этим трудностям можно отнести теневые эффекты, усложняющие процесс определения контура дескриптора, и неоднородности их положения на гладких поверхностях. Это часто приводит к тому, что они распознаются как несколько объектов или как единичный урезанный объект. В результате не может быть получена требуемая точность определения координат при распознавании фигуры. Пример такого изображения представлен на рис. 2.

Очевидно, что многие из этих проблем обусловлены тем, что динамика освещенности и отраженного сигнала от объекта во время движения в среде быстро изменчива и, как правило, плохо поддается формализации. Также имеется большая сложность в понимании свойств и форм ложных объектов, находящихся в пространстве между фигурой и камерой. Моделирование такой среды становится сложной задачей.

Создание некоторой фигуры из дескрипторов [Фу и др., 1989] позволяет с помощью разметки линий и соединений между ними добиться положительного эффекта в отождествлении выбранной фигуры по ее частям. Однако такой метод не позволяет учитывать количественные эффекты взаимодействия освещения и отражения в полном объеме. Для решения этой задачи был использован более перспективный подход, основанный на математических моделях, описывающих зависимость между освещением, отражением и характеристиками поверхности

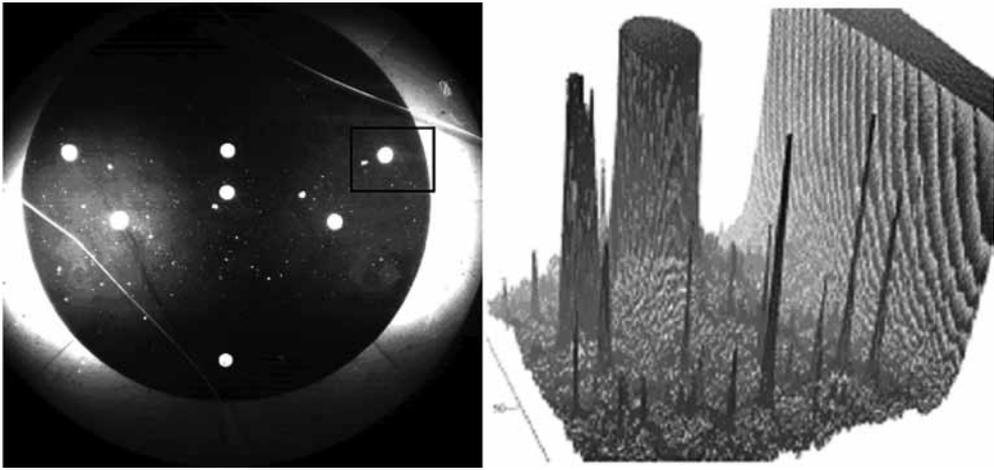


Рис. 2. Изображение мишени под водой и профиль интенсивности выделенного фрагмента

в зависимости от ориентации. На первом этапе, как было сказано выше, грубо определяются дескрипторы, их количество и положение. На основе этой информации оцениваются наклон поверхности и геометрические параметры расположения фигуры по отношению к оптической оси камеры. Это, в свою очередь, позволяет уточнить реальные характеристики дескрипторов, повысить точность отождествления и соответственно пространственное положение относительно камеры.

Выбранный метод связан с выделением порогового уровня по интенсивности сигнала от объекта. В реальности она зависит от параметров, которые определяют амплитуду сигнала каждого пиксела, а следовательно и образ. К таким параметрам относятся: экспозиция кадра, пороговое значение соотношения сигнал/шум и гистограмма распределения интенсивности пикселей образа от амплитуды сигнала. Поэтому в процессе выделения используются несколько переменных, которые меняют характеристики каждого пикселя образа, увеличивая, таким образом, не только степень различия между объектом и фоном, но и между самими объектами. Такая процедура осуществляется для каждого образа. Гистограмма распределения интенсивности пикселей необходима для нормирования образа и обеспечения правильного выбора динамического диапазона.

Этап выбора порогового уровня сигнала заключается в нахождении некоторой группы точек в трехмерном пространстве, где каждая группа имеет подобную основную моду гистограммы. В дальнейшем на основе полученных гистограмм определяются по нескольким критериям все элементы образа на предмет их подобия друг другу. К таким критериям можно отнести параметры эллипса, значения полуосей, площадь и центр масс. Этот процесс осуществляется путем оптимального поиска некоторой функции подобия $F(T, K, t)$ трех переменных. Переменными в этой функции являются экспозиция, соотношение сигнал/шум и время. Поиск экстремума для данной функции занимает достаточно много вычислительного процессорного времени. Для этого использовался алгоритм направленного случайного поиска. Количество шагов сходимости определялось как:

$$N \geq \frac{\ln(1-P)}{\ln(1-P_\varepsilon)},$$

где P_ε — вероятность нахождения экстремума при единичном шаге; P — вероятность того, что мы найдем решение за N испытаний

$$P = 1 - (1 - P_\varepsilon)^N.$$

Поскольку в нашем случае отдельные изображения связаны между собой априорно, результаты проведенных измерений использовались для формирования последующих. Сходимость такого метода, как правило, высокая, что было проверено моделированием процесса. Таким образом, достигалась высокая скорость вычислений и сходимость алгоритма в заданных значениях.

Моделирование устойчивости алгоритмов при анализе изображения в части яркостно-геометрической изменчивости объектов и других процессов показало сильную зависимость работы алгоритмов от ложных помех и достоверности идентификации объектов. Многие ложные объекты определялись как истинные, а истинные не идентифицировались вообще. Для повышения устойчивости были приняты меры в части создания многоуровневых фильтров в различных точках алгоритмов. На первом уровне использовался самый простой алгоритм отбраковки ложных объектов, который работал на критерии подобия. За счет этого отбраковывались объекты сильно отличающиеся от заданных. На втором уровне использовались фильтры, которые обеспечивали отбраковку по критерию образа, который учитывал не только полуоси объекта, но и форму сигнала образа в пространстве. На самом высоком уровне использовалась фильтрация по критерию достоверности видимой фигуры. На последнем этапе применялся фильтр сглаживания второго порядка для устранения единичных сбоев и мерцающих объектов на некотором временном интервале. В совокупности введенные фильтры повышали устойчивость работы всех алгоритмов прибора.

По заданным требованиям необходимо было учитывать влияние динамики движения объекта на решение задачи технического зрения. Для этого были определены функции зависимости параметров объекта от времени, к которым в первую очередь относится смазывание изображения за время экспозиции. Для этого в приборе был предусмотрен режим слежения и удержания, работавший по принципу предсказания будущего положения объектов на следующем шаге. В силу ограниченных размеров дескрипторов и переменной дальности до них, необходимо было учитывать величину смазывания, которая возникает даже при незначительных скоростях движения аппарата. Такое искажение изображения объекта, в конечном счете, приводит к ошибке вычисления геометрии и координат положения. Для устранения влияния движения в первом приближение выбиралась максимальная частота кадров, что обеспечивало хорошую точность устранения погрешности по первому порядку. Оставшуюся ошибку определяли, исходя из динамики движения аппарата по вычислению его скорости в режиме удержания. Ошибкой третьего порядка для заданных точностей можно было пренебречь. Результаты моделирования и выбранные на их основе алгоритмы позволили обеспечить:

- высокую достоверность выделения и идентификации объектов и фигуры;
- высокую точность определения координат;
- высокую устойчивость работы прибора в сложной среде.

Литература

- [Анисимов, 1983] *Анисимов Б. В., Курганов В. Д.* Распознавание и цифровая обработка изображений. М.: Высшая шк., 1983.
- [Липатов и др., 2009] *Липатов А. Н., Ляш А. Н., Макаров В. С., Антоненко С. А., Захаркин Г. В.* Оптический датчик координат для системы автоматической посадки // Современ. проблемы определения ориентации и навигации космич. аппаратов: Сб. тр. Всерос. научно-технич. конф. Россия, Таруса, 22–25 сент. 2008. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 146–156. (Сер. «Механика, управление и информатика»).
- [Соколов, 1974] *Соколов О. А.* Видимость под водой. Л.: Гидрометеиздат, 1974.
- [Фу и др., 1989] *Фу К., Гонсалес Р., Ли К.* Робототехника. М.: Мир, 1989.

TECHNICAL VISION FOR THE AUTOMATICALLY LANDING AND DOCKING UNDERWATER SYSTEM

A. N. Lipatov¹, A. N. Lyash¹, V. S. Makarov¹, S. A. Antonenko², G. V. Zakharkin²

¹ *Space Research Institute (IKI RAN), Moscow*

² *Joint venture “INTERASTRO”, Moscow*

For the realization of the process of a moving object landing and docking the device that determine the coordinates of the object's current position is needed. In the article presented an optical coordinates sensor — the device for a coordinate measurement of the position of the moving object relative to the fixed markers located on the landing plane. A feature of the optical sensor is that it is designed to work in the water environment. In the process of landing an active illumination of the topographic target is used. The report concerns the main principal of device constructions and the image processing algorithms as the technical vision system.

Keywords: Optical sensor, machine vision, topographic target, automatic landing.

Lipatov Alexander Nikolaevich — leading scientist, PhD, e-mail: slip@iki.rssi.ru.

Lyash Andrey Nikolaevich — scientist, e-mail: alyash@iki.rssi.ru.

Makarov Vladislav Sergeevich — leading specialist, e-mail: vmakarov@mx.iki.rssi.ru.

Antonenko Sergey Anatol'evich — leading specialist, e-mail: eslab@mail.ru.

Zakharkin Gennady Vladimirovich — leading specialist, e-mail: eslab@mail.ru.

ОТРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОНОМНОГО ВЫБОРА МЕСТА ПОСАДКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ФОБОС-ГРУНТ» ПО ТЕЛЕВИЗИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Б. С. Жуков, С. Б. Жуков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва

При посадке космического аппарата (КА) «Фобос-Грунт» на поверхность Фобоса по телевизионным изображениям в реальном времени будет строиться карта неоднородности поверхности, по которой может выбираться наиболее ровное место для посадки. В качестве основного критерия неоднородности используется относительная дисперсия сигнала с дополнительным учетом наличия теней и близости крупных неоднородностей изображения. Алгоритм и реализующее его бортовое программное обеспечение отработаны по реальным изображениям Фобоса, Марса и Луны высокого разрешения, а также по изображениям специально подготовленных шероховатых поверхностей.

Ключевые слова: миссия «Фобос-Грунт», посадка на Фобос, телевизионная система навигации и наблюдения (ТСНН), бортовая обработка изображений, карта неоднородности поверхности.

ЗАДАЧИ ТСНН ПО ВЫБОРУ МЕСТА ПОСАДКИ КА «ФОБОС-ГРУНТ»

Основная цель миссии ФОБОС-ГРУНТ — посадка на Фобос и доставка на Землю образцов его грунта. Важная роль в проекте отводится телевизионной системе навигации и наблюдения (ТСНН), которая будет использоваться для решения как научных, так и навигационных задач [Аванесов и др., 2010]. В состав ТСНН входят две узкоугольные и две широкоугольные телевизионные камеры (УТК и ШТК) с полем зрения $0,85$ и 23° и разрешением 3 и 85 угл.с соответственно.

Приоритетной задачей съемок Фобоса с орбит искусственного спутника Марса является уточнение района посадки. Предварительный выбор района посадки сделан на основании имеющихся в настоящее время снимков Фобоса с разрешением ~ 4 м. Размеры района соответствуют эллипсу рассеяния точки посадки 400×800 м соответственно по широте и долготе. Разрешение орбитальных изображений УТК будет на порядок лучше. Тем не менее вряд ли удастся найти участок таких размеров без неровностей рельефа, которые могут представлять опасность при посадке. Поэтому по полученным с орбиты снимкам потребуется выбрать район с минимальным количеством опасных неровностей, а выбор конкретного места посадки размером ~ 10 м и наклоном менее $\sim 20^\circ$ проводить автономно при спуске с высоты $300 \dots 50$ м по телевизионным изображениям. По изображениям ШТК в реальном времени будет строиться и передаваться в бортовой вычислительный комплекс (БВК) карта, характеризующая

Жуков Борис Сергеевич — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: bzhuikov@nserv.iki.rssi.ru.

Жуков Станислав Борисович — старший лаборант.

пригодность поверхности для посадки. По ней может оцениваться место посадки, прогнозируемое по текущим траекторным измерениям. В случае его непригодности будет приниматься решение о выполнении дополнительного бокового маневра для приведения КА к оптимальному месту посадки.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА И ЕГО ОТРАБОТКА

Поскольку вычислительных ресурсов процессоров камер ТСНН не достаточно для построения в реальном времени трехмерной модели поверхности Фобоса, был выбран фотометрический способ характеристики рельефа. При расчетном фазовом угле (Солнце — объект — наблюдатель) при посадке, равном 50° , большие камни могут распознаваться по отбрасываемым ими теням, а кратеры и борозды — по перепадам яркости, связанным с их наклонами и определяемым индикатрисой рассеяния поверхности [Жуков, Жуков, 2011].

Возможность применения фотометрического метода для оценки сложности рельефа определяется следующими факторами:

- поверхность Фобоса относительно однородна по составу, вследствие чего неоднородность ее изображения определяется, в основном, рельефом;
- предварительный выбор района посадки должен обеспечить отсутствие в этом районе крупных неровностей, например, кратеров диаметром ~ 100 м или более, на крутых склонах которых могут быть ровные площадки размером ~ 10 м.

Хотя работа ШТК начинается с момента схода с орбиты (с высоты около 30 км), карту неоднородности предлагается использовать на высотах от 300 до 50 м, для которых и необходимо оптимизировать ее параметры так, чтобы:

- разрешение изображений находилось в интервале 10...50 см с тем, чтобы, с одной стороны, распознавать опасные неровности, с другой — избежать влияния на неоднородность изображения мелкомасштабной структуры реголита, не влияющей на безопасность посадки, но имеющей высокий контраст;
- размер окна соответствовал площадке требуемого размера ~ 10 м на поверхности Фобоса.

Для выполнения этих требований достаточно использовать четырехкратно загрубленное изображение, позволяющее резко сократить вычислительные затраты по сравнению с обработкой исходного изображения, а на высотах ниже 50 м — проводить дополнительное загрубление изображения. Структура получаемых изображений анализируется в движущемся окне, размер которого соответствует требуемому размеру площадки.

В качестве основного критерия неоднородности изображения выбрана относительная дисперсия яркости в пределах окна

$$d = 1000\sigma^2/a^2, \quad (1)$$

где σ и a — среднеквадратическое отклонение и среднее значение яркости в окне, а коэффициент 1000 подобран так, чтобы для реальных изображений значения d , в основном, лежали в интервале от 0 до 255.

Четырехкратно загрубленное изображение делится на 25×25 ячеек и для каждой ячейки вычисляются дисперсия и среднее значение. Минимальный размер

окна составляет 2 ячейки и увеличивается при уменьшении высоты для поддержания требуемого размера площадки. Окно сдвигается по изображению с шагом в 1 ячейку. Расчет критерия (1) для каждого окна осуществляется с использованием указанных параметров ячеек, что позволяет анализировать перекрывающиеся окна без существенного увеличения вычислительных затрат.

Если в пределах окна обнаруживаются ячейки, яркость которых составляет менее 0,2 от максимальной яркости всех ячеек на изображении, то считается, что окно содержит тени, и ему присваивается максимальное значение кода неоднородности 255.

Хотя размер окна соответствует безопасному размеру площадки для посадки КА, для дополнительного обеспечения безопасности в окончательном варианте карты неоднородности с весом 0,2 учитывается также максимальное значение d соседних окон с тем, чтобы выбранная площадка не граничила с крупными неровностями поверхности.

Оптимальным местом посадки считается окно, в котором значение карты неоднородности минимально.

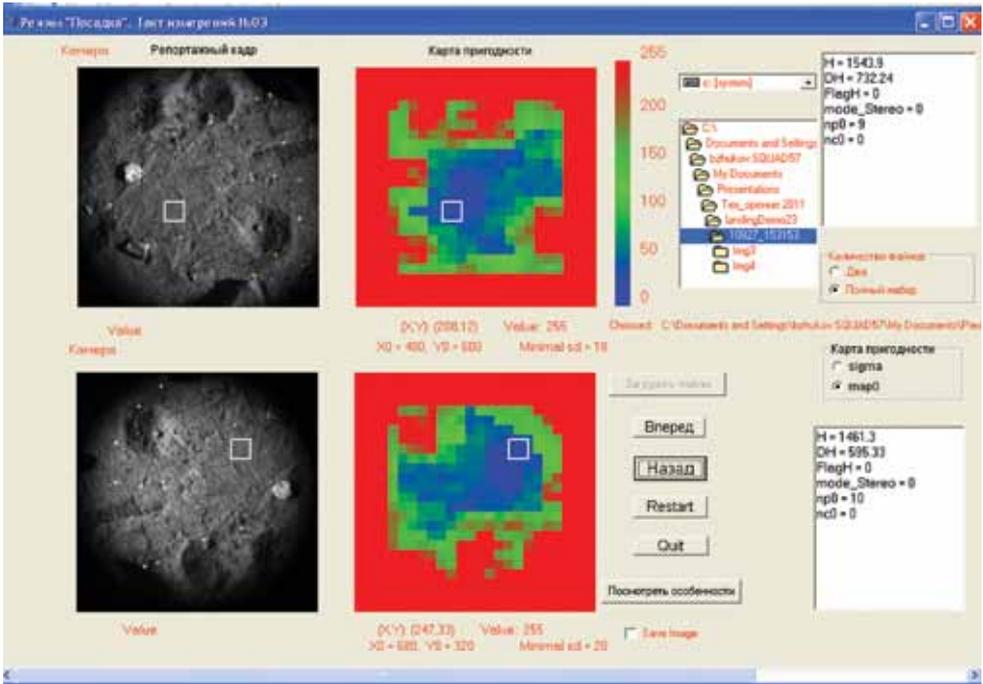
Время выполнения операций по построению карты неоднородности на бортовых процессорах камер ШТК с тактовой частотой 24 МГц составляет 0,1 с. Карта передается в БВК вместе с репортажным кадром и результатами стерео измерений высоты и боковых смещений 1 раз в 6 с.

Алгоритм был отработан на изображениях Фобоса, Луны и Марса высокого разрешения [Жуков, Жуков, 2011]. Окончательная отработка алгоритма и реализующего его бортового программного обеспечения проводилась на стенде ТСНН, на котором камеры ШТК через коллиматорные объективы снимали мониторы имитаторов поверхности Фобоса. На мониторы выводилась последовательность стерео изображений специально подготовленных шероховатых поверхностей, разрешение и стерео параллакс которых изменялся в соответствии с заданной траекторией посадки на Фобос. Смена изображений была синхронизирована с циклом работы ТСНН.

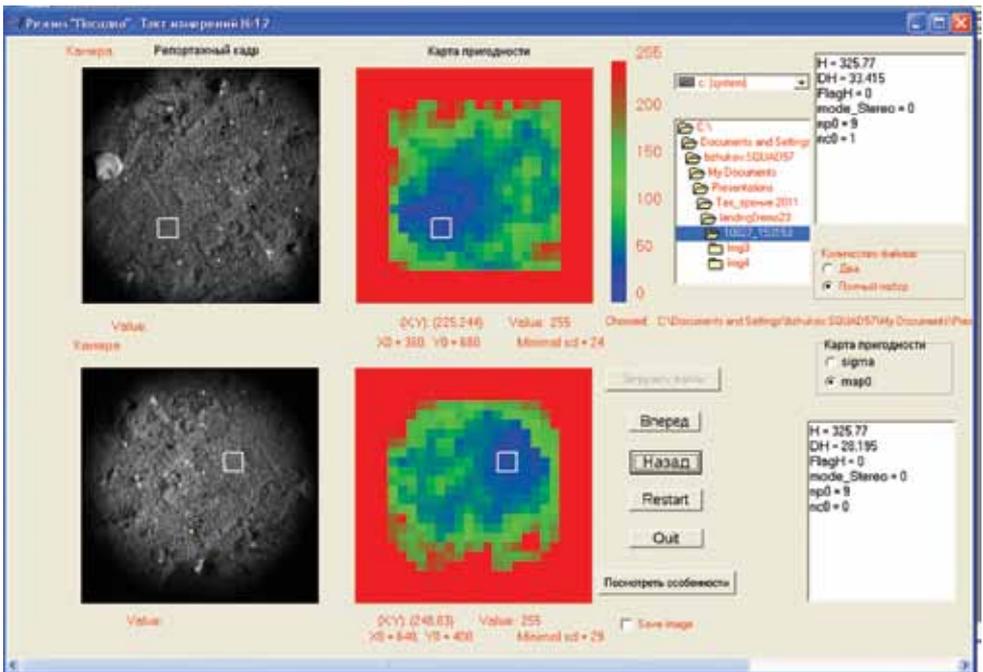
На рисунках приведены результаты, полученные на стенде ТСНН при параллельной работе двух камер ШТК. Поскольку на КА камеры развернуты относительно друг друга на 180° вокруг оптической оси, получаемые ими изображения и карты неоднородности также развернуты на 180° . Представленные примеры соответствуют четырем высотам от 1500 до 47 м на траектории посадки. При увеличении неоднородности поверхности цвет карты изменяется от синего до красного. Оптимальное место посадки указано белым квадратом. Данные примеры подтверждают, что получаемая карта неоднородности адекватно отображает опасные неровности поверхности и позволяет выбрать оптимальное место посадки.

Литература

- [Аванесов и др., 2010] *Аванесов Г. А., Гордеев Р. В., Гришин В. А., Жуков Б. С., Жуков С. Б., Коломеец Е. В., Краснопевцева Е. Б., Куделин М. И., Крупин А. А., Муравьев В. М., Форш А. А.* Телевизионная система навигации и наблюдения // *Астроном. вестн.* 2010. Т. 4. № 5. С. 473–479.
- [Жуков, Жуков, 2011] *Жуков Б. С., Жуков С. Б.* Алгоритм автономного выбора места посадки КА «Фобос-Грунт» по телевизионным изображениям // *Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса.* 2011. Т. 8. № 2. С. 281–288.

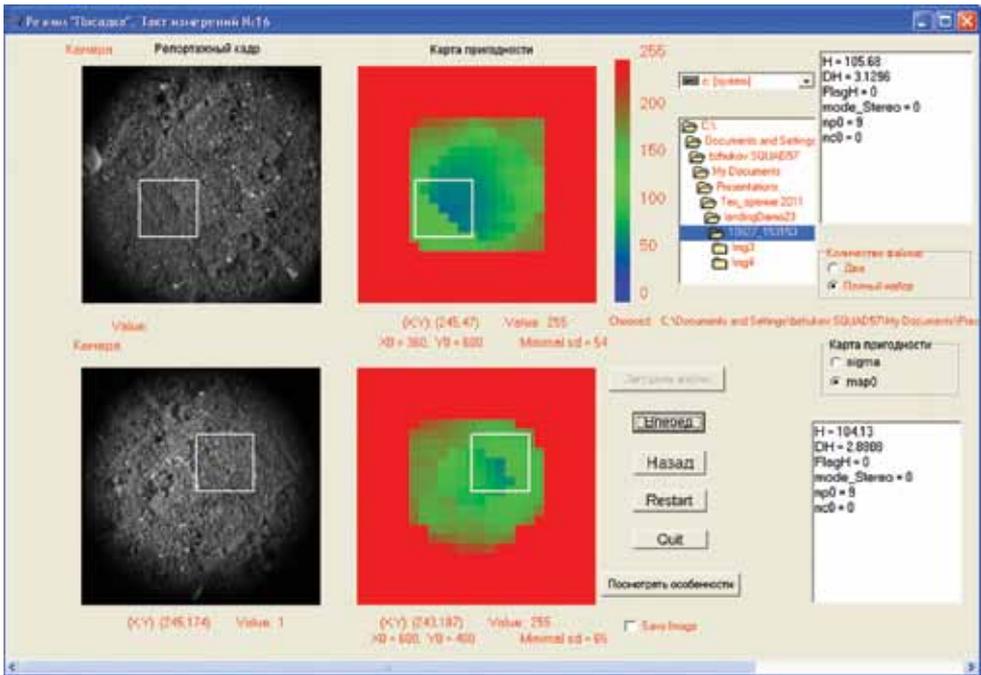


а

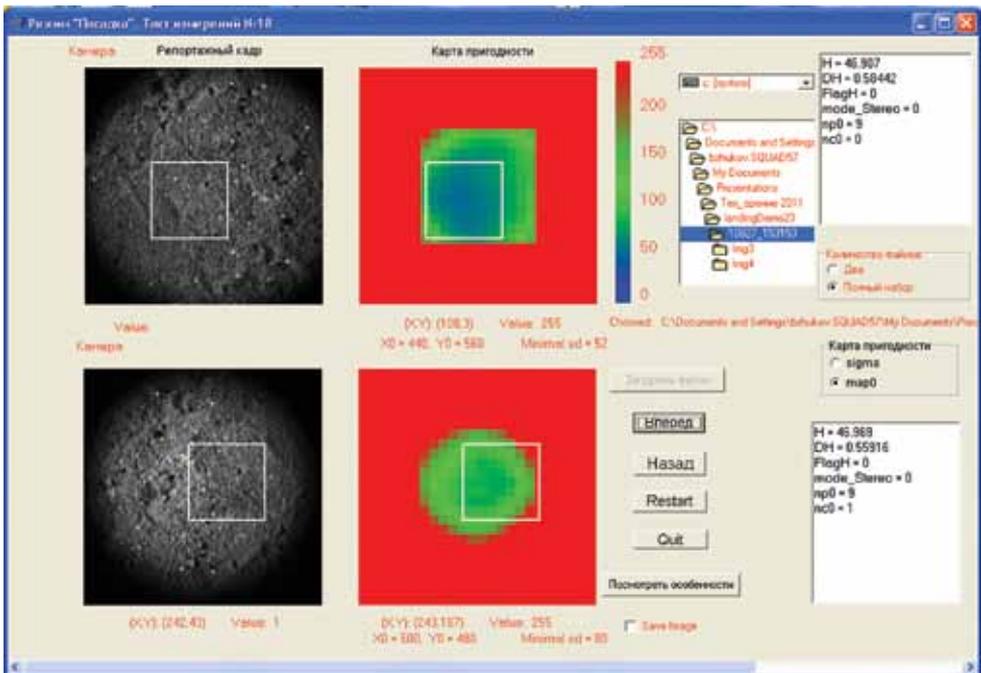


б

Изображения (слева) и карты неоднородности (в центре), полученные на стенде ТСНН для высот: а — 1500 м; б — 326 м



6



2

Изображения (слева) и карты неоднородности (в центре), полученные на стенде ТСНН для высот: σ — 105 м; ε — 47 м

**TESTING OF THE ALGORITHM FOR AUTONOMOUS LANDING
SITE SELECTION OF THE PHOBOS-GRUNT SPACECRAFT**

B. S. Zhukov, S. B. Zhukov

Space Research Institute (IKI RAN), Moscow

Landing of the Phobos-Grunt spacecraft on the surface of Phobos will be supported by real-time computation of a surface non-homogeneity map that will be used to select the most flat site. The relative signal dispersion is chosen as the principal non-homogeneity criterion, with additional accounting for shadows and proximity of strong image non-homogeneities. The algorithm and the on-board software were tested using high-resolution images of Phobos, Mars and the Moon, as well as of specially designed rough surfaces.

Keywords: Phobos-Grunt mission, landing on Phobos, TSNN, on-board image processing, surface non-homogeneity map.

Zhukov Boris Sergeevich — senior scientist, PhD, e-mail: bzhukov@nserv.iki.rssi.ru.
Zhukov Stanislav Borisovich — senior laborant.

ПОИСК ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НАБЛЮДАЕМОЙ СИТУАЦИИ

Н. В. Ким, А. Г. Кузнецов

Московский авиационный институт
(Государственный технический университет, МАИ), Москва

Рассматриваются вопросы использования методов анализа ситуации для решения задач навигации беспилотного летательного аппарата (БЛА) и формирования стратегии поиска объектов с использованием БЛА. Предложена структура системы анализа ситуации. Рассмотрены вопросы построения описания наблюдаемой сцены и сравнения полученного описания с эталонным.

Ключевые слова: анализ ситуации, беспилотный летательный аппарат, навигация, описание сцены.

В настоящее время системы технического зрения (СТЗ), установленные на борту беспилотных летательных аппаратов (БЛА), позволяют выполнять автономную навигацию по наблюдаемым ориентирам, осуществлять поиск подвижных и неподвижных объектов, решать другие задачи наблюдения. Неопределенность и переменность условий наблюдения, большие объемы видовой информации, необходимой для обработки в реальном времени, и ряд других факторов усложняют реализацию многих задач.

Одно из направлений, позволяющих повысить эффективность — анализ наблюдаемой ситуации. Под этим в работе понимается выделение объектов интереса и определение их взаимосвязей (отношений), существенных с точки зрения выполняемой целевой задачи (ЦЗ).

Включение процедуры анализа ситуаций в традиционный процесс наблюдения предлагается реализовывать в соответствии со схемой на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма анализа ситуаций

Ким Николай Владимирович — профессор, кандидат технических наук, e-mail: NKim2003@list.ru.

Кузнецов Андрей Григорьевич — младший научный сотрудник, e-mail: kag2006@mail.ru.

После получения ЦЗ (см. рис. 1, п. 1) проводится прием видовой информации (п. 2) и организуется решение задачи традиционными методами. Если задача не решена (п. 3), необходимо перейти к формированию описаний (п. 4), которые могут помочь успешному решению ЦЗ. Описания формируются на основе анализа текущей ситуации и имеющейся априорной информации. При этом могут быть использованы описания различного уровня ($R \ \varepsilon \ r$) сложности.

При формировании описаний (п. 4) на первом этапе реализуются алгоритмы, обеспечивающие обнаружение объектов интереса. На следующем этапе определяются атрибуты объектов и отношения между ними (в частности, геометрические отношения). На основании полученных данных формируется текущее описание наблюдаемой сцены (ситуации).

Это описание должно представлять собой перечисление наблюдаемых объектов с указанием их признаков, взаимного расположения на изображении и других отношений.

Рассмотрим пример формирования описания для случая решения навигационной задачи. Традиционно, с использованием системы технического зрения, оно предполагает обнаружение в поле зрения камеры объектов с известными пространственными координатами, по которым можно однозначно определить собственное положение. В том случае, если такие объекты в поле зрения камеры отсутствуют или в районе решения ЦЗ их количество недостаточно, задача может быть выполнена за счет сравнения текущего описания сцены с некоторым эталоном.

Для получения первого кадра можно сформировать описательное предложение вида:

«Я нахожусь в квадрате $[x_1, y_1]$ с вероятностью P_1 , или в квадрате $[x_2, y_2]$ с вероятностью P_2 , или... Моя высота h , угол крена γ , угол тангажа u , угол курса Ψ . Я наблюдаю четырехполосную дорогу с грунтовой обочиной, ниже которой находится лужайка и еще ниже лес, выше которой находится пролесок и еще выше луг». Такому определению положения соответствует на карте местности шесть областей. На языке ситуационного управления это предложение можно записать следующим образом.

В предложении определены две мысли (предиката) — предикат положения и предикат наблюдения. Первый можно записать в виде:

$$((\exists[x_1, y_1]^{\wedge}P_1) \vee (\exists[x_2, y_2]^{\wedge}P_2) \vee \dots)^{\wedge}X(h, \gamma, u, \Psi).$$

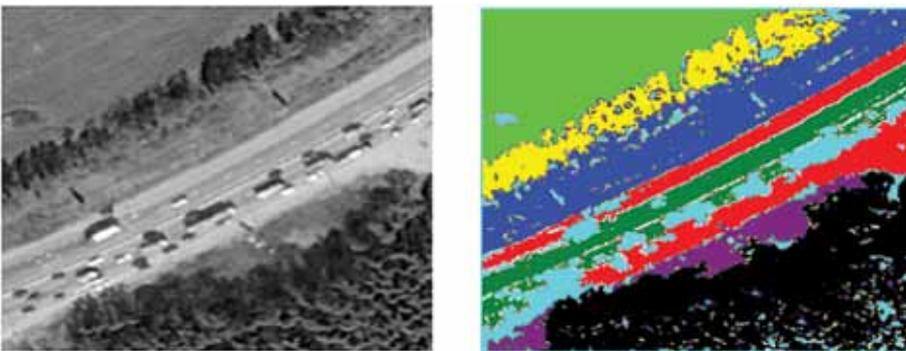


Рис. 2. Исходное и сегментированное изображения наблюдаемой сцены

В этом случае используются следующие символы: \exists , \wedge , \vee — символы принадлежности, логического «и», логического «или» соответственно; X — функция состояния.

Предикат наблюдения формируется с учетом взаимосвязей и характеристик наблюдаемых объектов. На рис. 2 показан исходный кадр и результат применения процедуры сегментации для выделения различных объектов по признакам яркости и σ яркости.

С использованием разработанного программного обеспечения получено следующее описание наблюдения:

$$\begin{aligned} &N((O(1)^T(S1^L4)^{(K(x126^y109)^M(Jx:7041281 Jy:24019394))} \\ &("3"(O(2)^T(S2)^{(K(x157^y100)^M(Jx:5963281 Jy:21718900))} \\ &"3"(O(3)^T(Sq900)^{(K(x124^y73)^M(Jx:11503574 Jy:36472907))} \\ &"3"(O(4)^T(Sq700)^{(K(x104^y55)^M(Jx:4834330 Jy:13672617))} \\ &"3"(O(3)^T(Sq2500)^{(K(x60^y32)^M(Jx:4475891 Jy:14977419))} \\ &("7"(O(3)^T(Sq500)^{(K(x135^y140)^M(Jx:2827345 Jy:6941276))} \\ &"7"(O(4)^T(Sq3000)^{(K(x165^y166)^M(Jx:6991476 Jy:38140022))} \\ &(A(1)^T(N"1"^N"5"))\exists O(1)) \end{aligned}$$

В описании использованы обозначения: O — объект; T — свойства объекта; K — координаты центра масс объекта; M — моменты инерции объекта; A — действие; "3" — направление на объект; S — тип покрытия; L — количество полос; N — направление движения; Sq — площадь; x , y , Jx , Jy — значения координат и моментов инерции объекта соответственно.

Вид объекта O или действия A задается индексом в скобках. Так, для объекта: 1 — дорога, 2 — обочина, 3 — луг, 4 — лес; для действия: 1 — движение.

В качестве главного объекта, относительно которого определяются остальные, выбирается наблюдаемый объект с максимальной информативностью.

Сформированные описания передаются в блок анализа данных.

На выход блока поступает информация, определяющая дальнейшую стратегию действий БЛА (какие объекты искать, какие алгоритмы обработки изображений использовать, какой тип управления реализовывать и пр.).

Основным ядром блока анализа данных является база данных, в которой хранится информация о районе решения целевой задачи. Эта информация описывает объекты, их признаки, связи между ними. Фрагмент одной из таблиц такой базы показан ниже.

База данных признаков объектов

Nobj	ObjectForm	Object	Brightn.Exp	Brightn.Std	Ψ	X	Y	Prob.
0	Треугольник	Озеро	0	0	0	3	21	0
1	Многоугольник	Автодорога	1	0	20	58	64	0
2	С-образная	Лес	0	0	0	91	34	0
3	Овал	Лес	0	0	0	20	84	1
4	Трапеция	Озеро	0	0	0	03	70	1

В рамках работы сопоставление текущего и эталонного описаний проводится с использованием языка запросов SQL.

Так, пример запроса на получение собственных координат имеет вид:

```
SELECT X,Y FROM ObjectsTabl WHERE Object = 'Автоморога' AND neighbor =
'Лес'AND...
```

Конкретные значения используемых полей получаютсЯ из сформированных описаний. Если в результате отработки запроса возвращается большое количество возможных областей присутствия БЛА, то структура запроса изменяется, делается более подробной — вводятся все соседние объекты с направлениями на них и предыстория с учетом предыдущих кадров. Объем и подробности информации увеличиваются до получения устойчивого результата (в том числе отрицательного).

Еще одной задачей, в которой может быть использован предлагаемый подход, является поиск БЛА мобильных объектов. Рассмотрим задачу поиска, например, автомобиля в городских условиях (ЦЗ — обнаружение объекта поиска).

Будем считать, что в соответствии с рис. 1 (п. 3), если задача ЦЗ не решена, необходимо сформировать описание ситуации. Данное описание должно помочь определить область, в которой встреча БЛА с искомым объектом будет наиболее вероятной.

В этом случае рассмотренных выше правил, позволяющих описать только геометрические отношения между объектами, недостаточно: желательно введение средств, позволяющих учитывать целевые функции объекта, динамические возможности, особенности его поведения и пр. При этом одним из наиболее важных является описание каузальных (причинно-следственных) отношений.

Удобным средством описания каузальных отношений представляются технологии искусственного интеллекта, в частности, производционные системы.

В этих системах знания (например, экспертов или полученные в результате моделирования) о вероятных следствиях и предпочтительных стратегиях решения проблем представлены в виде производционных правил:

$$(j) S; L; A \Rightarrow B; Q,$$

где j — индивидуальный номер продукции, отличающий ее от других производций системы; S — описание класса ситуации, в которой данная продукция используется; L — условие актуализации продукции; A, B — левая и правая части продукции; Q — указание, вводимые после реализации данной продукции. Например, A — если объект перемещается из точки (x_1, y_1) в точку (x_2, y_2) , B — объект должен двигаться на «север».

$$(((1)S;L_1;A_1 \Rightarrow B_1;Q_1]O \ni [x_1,y_1] \wedge P_1) \vee ((2)S;L_2;A_2 \Rightarrow B_2;Q_2]O \ni [x_2,y_2] \wedge P_2) \vee \dots).$$

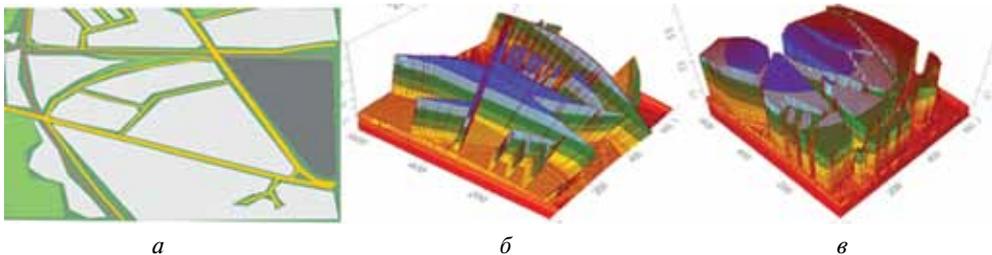


Рис. 3. Вероятности появления объекта на различных участках дороги: a — исходная карта местности; $б$ — вероятность при известном направлении движения объекта; $в$ — вероятность при условии «скрытности» движения

Графическое представление описаний ситуаций, полученных с учетом возможных стратегий поведения мобильного объекта, приведено на рис. 3. На рис. 3а показан фрагмент карты, являющийся пространством поиска. На рис. 3б представлены вероятности появления объекта на различных участках дороги, при условии известного направления движения объекта. Вероятности появления объекта, при условии «скрытности» движения, показаны на рис. 3в.

Как показывают расчеты, данные, полученные с помощью анализа ситуаций, позволяют повысить эффективность управления поисковыми ресурсами более чем на порядок.

Заключение

Предлагается подход, основанный на использовании описаний наблюдаемых ситуаций и позволяющий повысить эффективность наблюдений в неопределенных, сложных и изменяемых условиях.

Литература

- [Форсайт, Понс, 2004] *Форсайт Д.А., Понс Ж.* Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. 928 с.: ил. Парал. тит. англ.
- [Поспелов, 1986] *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 288 с.
- [Pospelov, 1986] *Pospelov D.A.* Situation control: theory and practice. Nauka, 1986. 288 p.

OBJECT SEARCHING, BASIC ON AN ANALISYS OF OBSERVED SITUATION

N. V. Kim, A. G. Kuznetsov

Moscow aviation institute (State technical university, MAI), Moscow

Questions of use of methods of the situation analysis for the decision of problems of navigation of an unmanned aerial vehicle (UAV) and formations of strategy of objects searching with use UAV are considered in the work. The structure of system of the situation analysis is offered. Questions of construction of the observable scene description and comparison of the received description with the reference are considered.

Keywords: Situation analysis, unmanned aerial vehicle, navigation, scene description.

Kim Nikolay V. — professor, PhD, e-mail: NKim2003@list.ru.

Kuznetsov Andrey G. — engineer researcher, e-mail: kag2006@Mail.ru.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ВИОЛЫ – ДЖОНСА С ДВУХТОЧЕЧНЫМИ ПРИЗНАКАМИ ДЛЯ ПОИСКА АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В ТРАВЕ

Ф. А. Корнилов, К. В. Костоусов, Д. С. Перевалов

*Институт математики и механики Уральского отделения РАН
(ИММ УрО РАН), Екатеринбург*

Показано, что применение алгоритма Виолы – Джонса с набором двухточечных признаков дает эффективный результат в задаче обнаружения одного класса объектов в условиях частичного загромождения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программ фундаментальных исследований Президиума РАН (№ 09-П-1-1003, 09-П-1-1013) и РФФИ (проект № 09-01-00523).

Ключевые слова: обнаружение объектов, алгоритм Виолы – Джонса, загромождение.

Введение

Задача поиска объектов известного класса — одна из самых интересных и сложных задач анализа изображений. К настоящему времени для ее решения разработано несколько универсальных подходов: нейронные сети, геометрическое сопоставление, алгоритм Виолы – Джонса, LBP (Local Binary Pattern — локальный бинарный паттерн), HOG (Histogram of gradients — гистограмма градиентов), обобщенное преобразование Хафа, марковские случайные поля.

Вариант задачи, когда искомым объектом может быть частично загорожен, — менее проработан. Известно, что методы геометрического сопоставления на основе марковских случайных полей и обобщенное преобразование Хафа позволяют успешно решать такую задачу в специальных случаях [Li Stan, 2009]. Вопрос применения остальных общих подходов, в частности, алгоритма Виолы–Джонса и его модификаций, менее ясен.

В данной работе приведены результаты, показывающие, что модифицированный алгоритм Виолы – Джонса применим для поиска определенных классов объектов в условиях частичного загромождения.

АЛГОРИТМ ВИОЛЫ – ДЖОНСА С ДВУХТОЧЕЧНЫМИ ПРИЗНАКАМИ

В настоящее время алгоритм Виолы – Джонса и его модификации — самые широко используемые для поиска лиц на изображении в реальном времени. В то же время, структура этих алгоритмов такова, что они могут быть обучены для поиска произвольных объектов фиксированной геометрической формы. Недавние исследования показали, что подобные алгоритмы достаточно хорошо могут решать задачу поиска лиц в случае частичного загромождения, если обучающая выборка содержит примеры таких изображений [Barczak, 2004].

Корнилов Федор Андреевич — аспирант, e-mail: fakornilov@mail.ru.

Костоусов Кирилл Викторович — главный программист, кандидат физико-математических наук, e-mail: giant199@mail.ru.

Перевалов Денис Сергеевич — главный программист, e-mail: denis.perevalov@mail.ru.

Одной из важнейших частей алгоритмов типа Виолы – Джонса является набор признаков. Наиболее часто используемые наборы — признаки типа Хаара и локальные бинарные паттерны [Viola, Jones, 2002; Ahonen et al., 2004].

Рассмотрим здесь более простой набор признаков, который состоит из разностей яркостей изображения в двух пикселах (x_1, y_1) и (x_2, y_2) , для всех возможных пар пикселей

$$feature(x_1, y_1, x_2, y_2) = image(x_1, y_1) - image(x_2, y_2).$$

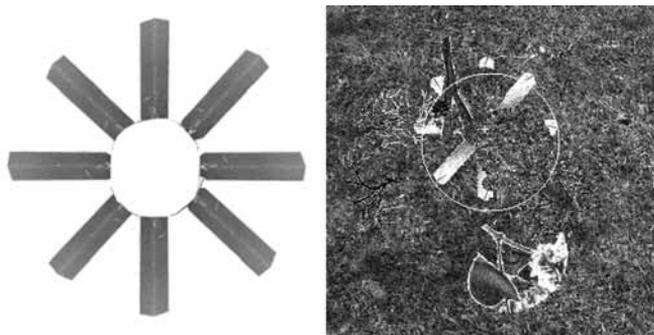
В отличие от признаков типа Хаара и локальных бинарных паттернов, этот набор признаков существенно нелокален. Это позволяет выдвинуть гипотезу, что он может хорошо работать в случае, когда искомые объекты имеют характерные особенности невыпуклой формы. Следует заметить, что подобные признаки ранее уже использовались рядом авторов для исследования задач типа распознавания пола человека по фотографии лица [Baluja, Rowley, 2007].

СРАВНЕНИЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ДВУХТОЧЕЧНОГО И ХААРОВСКОГО НАБОРОВ ПРИЗНАКОВ НА ОДНОМ КЛАССЕ ОБЪЕКТОВ

Исследуем работоспособность двухточечного набора признаков на примере прикладной задачи поиска «ромашкоподобных» объектов в траве, в условиях, когда объект интереса частично загорожен (см. рисунок).

А именно, сравним качество работы алгоритма с новым набора признаков и с признаками типа Хаара, исследованными Ф. А. Корниловым и другими ранее в [Корнилов и др., 2010]. Набор обучающих и тестовых изображений был искусственно сгенерирован путем наложения четырех слоев: травы; объекта интереса; структурного шума, состоящего из посторонних объектов типа сучков и листьев, и слоя однородного гауссова шума. Для обучения использовалось 300 положительных примеров размером 16×16 пикселей, в которых объект интереса размещался со случайным поворотом не более двух градусов, и 300 отрицательных примеров размером 128×128 пикселей. Количество этапов классификатора было $stages = 20$, порог вероятности пропуска классификатора $minhitrate = 0,995$, порог вероятности ложного срабатывания классификатора $maxfalsealarm = 0,5$.

Тестирование велось на 2000 синтезированных изображений размером 300×300 пикселей, при этом для учета возможного поворота выполнялось



Пример работы алгоритма: слева — объект интереса; справа — пример обнаружения объекта предложенным алгоритмом (белая окружность обозначает найденную локализацию объекта)

несколько проходов с разворотом изображений с шагом 5°. Тестирование показало: для набора двухточечных признаков частота правильного обнаружения составляла 85,7 %, ложной тревоги — 7,3 %. Для классического набора признаков типа Хаара — соответственно 84,2 и 4,9 %.

Заключение

Полученные результаты показывают, что новый набор признаков в данной задаче дает качество, сопоставимое с признаками типа Хаара. В то же время, предложенный набор является значительно более простым и быстро вычислимым.

В связи с этим возникают вопросы для дальнейшего изучения: как двухточечные признаки работают с обычными, «незагороженными» базами примеров лиц и как в различных задачах работают аналогично построенные трех- и четырехточечные признаки?

Литература

- [Корнилов и др., 2010] *Корнилов Ф. А., Костусов К. В., Перевалов Д. С.* Поиск изображений антропогенных объектов в траве методом Виолы-Джонса // Экстремальная робототехника: Тр. Международ. конф. Санкт-Петербург, 2010. С. 314–318.
- [Ahonen et al., 2004] *Ahonen T., Hadid A., Pietikäinen M.* Face Recognition with Local Binary Patterns // Computer Vision — ECCV 2004: Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg, 2004. V. 3021. P. 469–481.
- [Baluja, Rowley, 2007] *Baluja S., Rowley H. A.* Boosting sex identification performance // Intern. J. Computer Vision. 2007. V. 71(1). P. 111–119.
- [Barczak, 2004] *Barczak A. L. C.* Evaluation of a Boosted Cascade of Haar-Like Features in the Presence of Partial Occlusions and Shadows for Real Time Face Detection // RICAI 2004: Trends in Artificial Intelligence. Springer Berlin / Heidelberg, 2004. V. 3157. P. 969–970.
- [Li Stan, 2009] *Li Stan Z.* Markov Random Field Modeling in Image Analysis. 3rd ed. Springer Berlin / Heidelberg, 2009. 362 p.
- [Viola, Jones, 2002] *Viola P., Jones M.* Robust Real-time Object Detection // Intern. J. Computer Vision. 2002. V. 57. N. 2. P. 137–154.

USING VIOLA–JONES ALGORITHM WITH TWO-POINT FEATURES FOR HUMAN-MADE OBJECTS IN GRASS DETECTION

F. A. Kornilov, K. V. Kostousov, D. S. Perevalov

Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (IMM UB RAS), Ekaterinburg

It is shown that using Viola-Jones algorithm with two-point features gives good performance in the task of object detection for one particular class of objects in the case of occlusions.

Keywords: object detection, Viola-Jones algorithm, occlusion.

Kornilov Fedor Andreevich — PhD student, e-mail: fakornilov@mail.ru.

Kostousov Kirill Victorovich — chief programmer, PhD, e-mail: giant199@mail.ru.

Perevalov Denis Sergeevich — chief programmer, e-mail: denis.perevalov@mail.ru

Секция 6

АНАЛИЗ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ И ДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПУТИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Е. А. Девятериков, Б. Б. Михайлов

Научно-учебный центр «Робототехника»
Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана
(НУК РЦ МГТУ им. Н. Э. Баумана), Москва

Предлагается метод измерения пути мобильного робота с помощью технического стереозрения — метод визуальной одометрии, основанный на измерении смещения ключевых точек пространства, информация о которых получается из анализа последовательности изображений. Такая система может работать в недетерминированной, заранее не подготовленной среде, пассивна и нечувствительна к проскальзыванию колес. В статье приводится алгоритм визуальной одометрии, результаты исследования работоспособности алгоритма на виртуальной модели, структура реальной системы, результаты экспериментальных исследований системы, установленной на мобильном роботе.

Ключевые слова: стереозрение, техническое зрение, одометрия, измерение пути, мобильный робот.

АЛГОРИТМ ВИЗУАЛЬНОЙ ОДОМЕТРИИ

Для работы алгоритма визуальной одометрии [Nistér et al., 2005; Xu, Shen, 2006] (рис. 1) вводятся пары изображений с некоторым интервалом времени.

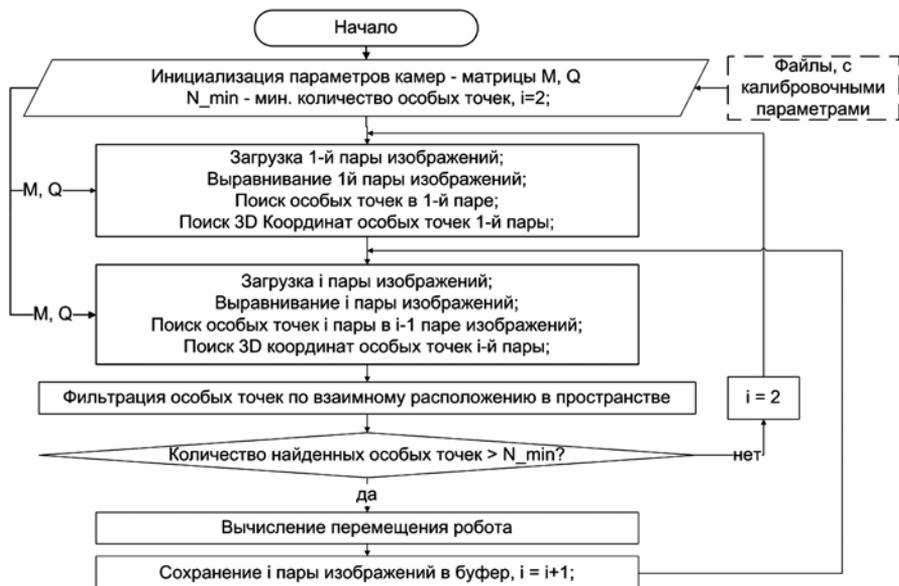


Рис. 1. Алгоритм визуальной одометрии

Девятериков Егор Анатольевич — студент, e-mail: retregor@mail.ru.

Михайлов Борис Борисович — доцент, кандидат технических наук, e-mail: robot@bmstu.ru.

Алгоритм включает следующую последовательность операций:

- 1) ввести первую стереопару, удалить искажения, выровнять эпиполярные линии (чтобы каждая точка левого изображения и соответствующая ей точка правого изображения лежали на одной горизонтальной прямой);
- 2) найти особые точки на левом изображении и эти же точки на правом;
- 3) найти пространственные координаты этих точек;
- 4) ввести вторую стереопару, удалить искажения, выровнять эпиполярные линии;
- 5) найти особые точки из предыдущего левого изображения на текущем;
- 6) найти особые точки текущего правого изображения на предыдущем;
- 7) найти трехмерные координаты точек текущего изображения;
- 8) сравнить точки в текущий и предыдущий момент времени, найти матрицы поворота и переноса камеры, перейти к п. 4.

ПОИСК ОСОБЫХ ТОЧЕК

Особая точка сцены — точка, изображение которой можно устойчиво отличать от изображений всех соседних с ней точек.

В методе Гарриса для окрестности точки находится матрица вторых производных от интенсивности — матрица Гессе:

$$H(p) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \end{bmatrix}.$$

Затем вычисляется функция R и ее значение сравнивается с пороговым

$$R = \det(H) - k(\text{trace } M)^2, \quad k = 0,04 \dots 0,06$$

Метод ускоренной сегментальной проверки (Features from Accelerated Segment Test — FAST) — один из самых быстрых. В нем яркости точек, образующих окружность заданного радиуса, сравниваются с яркостью точки в центре этой окружности [Rosten, 2005]. Если яркость, по крайней мере, N последовательных точек окружности отличается от яркости ее центра на заданное пороговое значение, то центр окружности считается особой точкой.

Надежный ускоренный метод поиска особых точек (Speeded-Up Robust Features — SURF) [Bay et al., 2008], инвариантных к масштабированию, повороту и освещенности, относится к лидерам по надежности. Здесь используется гауссово пространство. Критерий поиска T — определитель матрицы Гессе:

$$T = \det(H(x, \sigma)) = \begin{vmatrix} L_{xx}(x, \sigma) & L_{xy}(x, \sigma) \\ L_{xy}(x, \sigma) & L_{yy}(x, \sigma) \end{vmatrix},$$

$$L_{xx}(x, \sigma) = \frac{\partial g(x, y, t)}{\partial x \partial x} * I(x, y), \quad L_{xy}(x, \sigma) = \frac{\partial g(x, y, t)}{\partial x \partial y} * I(x, y), \dots,$$

где $g(x, y, t)$ — функция Гаусса со стандартным отклонением $t = \sigma^2$.

СЛЕЖЕНИЕ ЗА ЛОКАЛЬНЫМИ ОСОБЕННОСТЯМИ МЕТОДОМ ЛЮКАСА И КЕНЕДА

Для вычисления пути робота находится смещение особых точек между текущим и предыдущим изображениями методом Люкаса и Кенеда [Bradski, Kaehler, 2008]. Пусть x — особенность первой функции F , необходимо найти такую точку $x + h$ функции G , чтобы разность окрестностей этих точек была минимальна.

Расстояние между окрестностями записывается в виде:

$$E = \sum_{x \in R} [F(x+h) - G(x)]^2,$$

где $F(x)$, $G(x)$ — интенсивности точки на 1-м и 2-м изображениях. Функция $F(x)$ раскладывается в ряд Тейлора, находится минимум E , затем смещение h

$$0 = \frac{\partial}{\partial h} E \approx \frac{\partial}{\partial h} \sum_x \left[F(x) + h \frac{\partial F}{\partial x} - G(x) \right]^2 = \sum_x 2 \frac{\partial F}{\partial x} \left[F(x) + h \frac{\partial F}{\partial x} - G(x) \right],$$

$$h = \left[\sum_x \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)^T [G(x) - F(x)] \right] \left[\sum_x \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)^T \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right) \right]^{-1}.$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО ТОЧЕК

Если оптические оси камер параллельны, то расстояние до точки

$$Z = \frac{fT}{x^l - x^r},$$

где T — расстояние между камерами, f — фокусное расстояние, x^l и x^r — координаты проекций точки на левом и правом изображениях.

3D-МОДЕЛЬ ДЛЯ ОТЛАДКИ ПРОГРАММЫ

Для тестирования и отладки программы была создана трехмерная модель в среде SolidWorks (рис. 2), состоящая из двух виртуальных камер, стола и простых

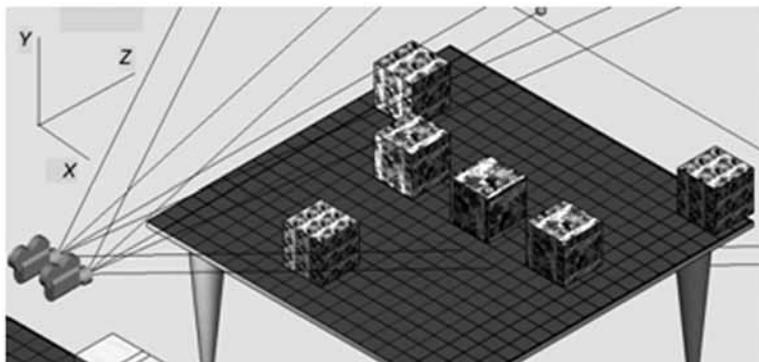


Рис. 2. Модель системы

объектов. При перемещении камер по замкнутой траектории ошибка выхода в начальную точку составила 5 % от суммарного пройденного пути. Таким образом, была установлена работоспособность алгоритма.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ

Для экспериментальной проверки программы, реализующей алгоритм визуальной одометрии, был изготовлен макет робота, показанный на рис. 3.

Состав системы, структура которой показана на рис. 4:

- видеокamеры Sony 640×480 (2 шт.);
- компьютер Intel i5 2.4GHz, 2Gb DDR3 (используется 1 поток);
- устройства видеозахвата Pinnacle DVC100 (2 шт);
- мобильная платформа.

Камеры были закреплены параллельно полу и друг другу, база 120 мм.



Рис. 3. Система визуальной одометрии на мобильном роботе

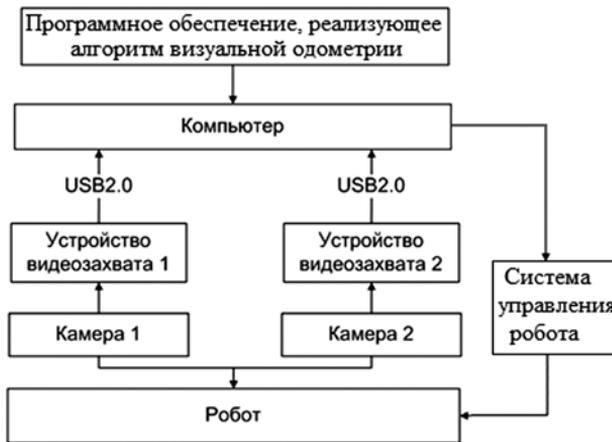


Рис. 4. Структура системы визуальной одометрии

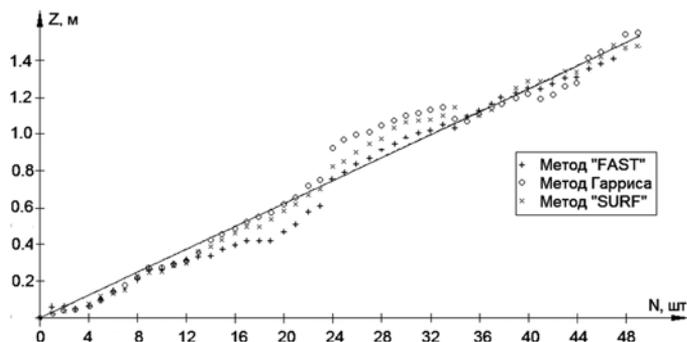


Рис. 5. График, полученный при смещении робота на равные интервалы: Z — пройденный путь; N — число обработанных стереопар

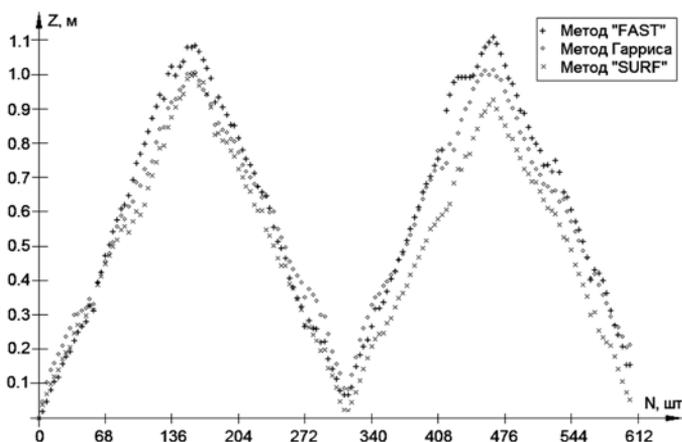


Рис. 6. График, полученный при перемещении робота по замкнутой траектории: Z — пройденный путь; N — число обработанных стереопар

Для оценки точности системы и алгоритмов поиска особых точек был несколько раз обработан один и тот же набор из 52 пар изображений, полученный при смещении робота вперед на равные расстояния, (рис. 5).

Затем робот многократно перемещался по замкнутой траектории, 1 м вперед-назад. Оценивалась средняя ошибка выхода в исходную точку (рис. 6).

В таблице показаны скорость обработки и ошибки при использовании трех методов поиска особых точек.

Сводная таблица результатов эксперимента

Метод выделения особых точек	Скорость обработки, стереопар/с	Ошибка выхода в исходную точку, %	Среднее квадратичное отклонение при смещении на равные интервалы, %
FAST	37,2	7,2	4,8
HARRIS	17,9	7,6	5,2
SURF	10,0	3,8	4,1

Заключение

Результаты эксперимента показывают, что метод визуальной одометрии позволяет достаточно точно измерить пройденный путь. При ошибке 3,8 %, самую высокую точность и низкую производительность (10 кадров/с) обеспечивает метод SURF. В режиме реального времени может работать метод FAST, позволяющий обрабатывать 37 пар кадров за секунду, но дающий ошибку 7,2 %. Система позволяет также измерять угол поворота робота с ошибкой 10 %.

В ходе работы были решены следующие задачи: разработана структура системы визуальной одометрии; реализован алгоритм визуальной одометрии в виде программы; разработана трехмерная модель системы для проверки работоспособности алгоритма; изготовлен макет системы; проверена работоспособность системы на реальных изображениях, полученных при движении мобильного робота; определены ее точность и быстродействие.

Литература

- [Bay et al., 2008] *Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Gool V.*, Speeded-Up Robust Features // Computer Vision and Image Understanding. 2008. V. 110. Iss. 3. P. 346–359.
- [Bradski, Kaehler, 2008] *Bradski G., Kaehler A.* Learning OpenCV. O'Reilly, 2008. 577 p.
- [Nistér et al., 2005] *Nistér D., Naroditsky O., Bergen J.* Visual Odometry // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2004. V. 1. P. I-652–I-659. doi: 10.1109/CVPR.2004.1315094.
- [Rosten, 2005] *Rosten E.* Fusing Points and Lines for High Performance Tracking // IEEE Intern. Conf. on Computer Vision. 2005. V. 2. P. 1508–1511.
- [Xu, Shen, 2006] *Xu J., Shen M.* Robust stereo visual odometry for autonomous rover. 2006.

COMPUTER VISION SYSTEM FOR MOBILE ROBOT PATH MEASURING

E. A. Devyaterikov, B. B. Mikhailov

*Bauman Moscow State Technical University Scientific-Educational Center
“Robotic Engineering”, Moscow*

The paper presents a mobile robot path measuring method based on computer stereo-vision system — visual odometry based on calculating of surroundings key-points flow. The keypoint data comes from stereo-image sequence processing. Such system capable of working in nondeterministic unprepared environment, passive and wheels slipping insensitive. The computer vision system useful for other purposes such as simultaneous localization and mapping. The paper consists of the algorithm description, results of algorithm testing with virtual model image sequence, structure of the mobile robot system, results of it's experimental testing with real image sequence, the feature detection algorithms comparison.

Keywords: stereovision, computer vision, odometry, trajectory recovering, mobile robot.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗБРОСА УГЛОВОГО И ЛИНЕЙНОГО ПОЛОЖЕНИЯ КАМЕР, А ТАКЖЕ АСИНХРОННОСТИ СЪЕМКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СТЕРЕОРЕЖИМЕ

В. А. Гришин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва

В статье представлена методика и результаты анализа влияния конструктивно-технологического разброса углового и линейного положений камер на ошибки измерения высоты в стереорежиме и параметры алгоритмов обработки изображений. Получены оценки степени влияния асинхронности съемки на ошибки измерения высоты для сценариев посадки ИПМ им. М. В. Келдыша.

Ключевые слова: посадка космических аппаратов, система технического зрения, измерение высоты по стереопарам.

Введение

В настоящее время системы технического зрения все более активно применяются в задачах управления процессом посадки [Cheng et al., 2005; Trawny et al., 2007]. На борту космического аппарата (КА) «Фобос-Грунт» установлена телевизионная система навигации и наблюдения (ТСНН), которая должна решать целый комплекс задач, в том числе определение дальности (высоты) до визируемой поверхности. Измерение высоты осуществляется стереоскопическим методом [Zhukov et al., 2007; Гришин, 2008]. Для работы в стереорежиме используются широкоугольные телевизионные камеры (ШТК), входящие в состав ТСНН. Калибровка камер выполняется на Земле. Однако в результате воздействия факторов длительного перелета (перегрузки на этапе выведения, температурные деформации и т. п.) калибровки могут быть нарушены, что чревато появлением заметных ошибок измерений. При этом могут иметь место неточности установления соответствия, что приводит к грубым ошибкам измерения высоты.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В данной работе ставилась задача оценить влияние разброса конструктивных параметров ориентации и положения камер ТСНН на точностные характеристики и параметры алгоритмов обработки изображения в стереорежиме. Анализировалось влияние разброса: трех углов относительного поворота между камерами; величины стерео базы и двух углов, характеризующих её поворот относительно заданного положения. Непосредственно перед посадкой КА могут быть прокалиброваны три угла относительного поворота между камерами.

Гришин Владимир Александрович — старший научный сотрудник, доцент, кандидат технических наук, e-mail: vgrishin@iki.rssi.ru.

Помимо определения ошибок измерения дальности (высоты) в зависимости от величины и наличия разбросов различных конструктивных параметров, оценивалось их влияние на положение и конфигурацию областей поиска соответствия. Конфигурация и размер областей поиска, задаваемые в алгоритмах установления соответствия, должны максимально точно соответствовать областям, в которых могут находиться искомые точки. При этом, если область поиска не покрывает всех точек изображения, где могут быть искомые точки, то это может приводить к ошибкам установления соответствия и, следовательно, грубым ошибкам измерения высоты. Перекрытие областью поиска точек изображения с большим запасом приводит к необоснованному росту вычислительных затрат и также увеличивает вероятность грубых ошибок установления соответствия.

Были проведены расчеты точности измерения дальности (высоты) при наличии разброса углов θ , ψ и φ , характеризующих разворот камер ШТК относительно друг друга. Величины углов разворота установили равными $\pm 1^\circ$. В условиях, когда камеры разнесены на достаточно большое расстояние ($1,622 \pm 0,005$ м), а несущая конструкция не отличается большой жесткостью, такие угловые развороты вполне вероятны. Расчеты показали, что без калибровки этих углов ошибки измерения дальности являются недопустимо большими. Далее предполагалось, что угловые развороты камер относительно друг друга измерены по результатам стереосъемки звездного неба, полученные данные переданы на борт КА и загружены в память процессоров ШТК. Поскольку параметры разброса ориентации базы (углы α и β) и ее длины b в условиях полета измерены быть не могут, то в алгоритмах используется значение длины базы, измеренное на Земле, а углы, характеризующие разворот стерео базы, полагаются равными нулю.

В табл. 1 приведены результаты расчета максимальных по модулю относительных ошибок измерения дальности Δ (в процентах) в зависимости от разброса конструктивных параметров для двух сценариев посадки ИПМ им. М. В. Келдыша на высотах, меньших 5500 м. Ошибки определялись для 30 угловых точек областей поиска особенностей.

Таблица 1

Влияние конструктивно-технологического разброса углового и линейного положения камер на точность измерения расстояния

Параметры	Δ , %
Совокупное влияние углов разворота базы: $\alpha = \pm 1^\circ$, $\beta = \pm 1^\circ$	0,340
Изменение длины базы: $b = 1,622 \pm 0,01$ м	0,630
Совокупное влияние разворотов камер: $\theta = \pm 1^\circ$, $\psi = \pm 1^\circ$, $\varphi = \pm 1^\circ$	0,014
Совокупное влияние всех разворотов: $\theta = \pm 1^\circ$, $\psi = \pm 1^\circ$, $\varphi = \pm 1^\circ$, $\alpha = \pm 1^\circ$, $\beta = \pm 1^\circ$	0,390
Совокупное влияние всех разбросов: $\theta = \pm 1^\circ$, $\psi = \pm 1^\circ$, $\varphi = \pm 1^\circ$, $\alpha = \pm 1^\circ$, $\beta = \pm 1^\circ$, $b = 1,622 \pm 0,01$ м	1,010

Анализируя табл. 1, можно сделать вывод, что наибольшее влияние на точность измерения расстояния оказывает изменение длины базы. Влияние вариации углов ее разворота меньше. Калибровка делает совершенно незначительным влияние разворотов камер. Совокупное воздействие всех факторов в 1,01% можно считать вполне приемлемым, тем более что это величина максимальной ошибки при всех возможных сочетаниях.

Полученные результаты также позволяют заключить, что нет необходимости вводить поправки в результаты измерений в зависимости от полученного значения дальности и положения точки на площади кадра.

Рассмотрим влияние конструктивно-технологического разброса в размещении камер на положение и конфигурацию областей поиска соответствия. Очевидно, что они не зависят от калибровки камер. Для указанных выше возмущений и интервала дальностей от бесконечности до 10 м был проведен расчет разброса положения отрезков поиска соответствия относительно его номинального положения для двух случаев (табл. 2). В первом случае при расчете отрезка поиска соответствия не учитывались результаты калибровки углов ориентации камер. Во втором — они учитывались.

Таблица 2

Влияние конструктивно-технологического разброса углового и линейного положения камер на размеры и положение отрезка поиска соответствия

Анализируемый параметр	Разброс ориентации камер не учтен	Разброс ориентации камер учтен
Разброс начальной точки отрезка поиска (в пикселях) по каждой координате	$\pm 13,2$	0
Изменение длины отрезка поиска (в пикселях)	от $-1,28$ до $+1,37$	от $-1,22$ до $+1,26$
Угол разворота отрезка поиска	$\pm 2,36^\circ$	$\pm 1,18^\circ$
Необходимый размер области поиска соответствия по координате Y (в пикселях)	± 18	± 3

Таким образом, размер области поиска по вертикальной координате Y уменьшается в шесть раз при учете углов разворота камер. Это позволяет существенно уменьшить вычислительные затраты на процесс установления соответствия и уменьшить вероятность аномальных ошибок.

Определялись выходы отрезков поиска соответствия за границы изображения для 30 угловых точек областей поиска особенностей с учетом запаса в 8 пикселей, необходимого для расчета спектральных коэффициентов образов окрестностей. При использовании полного диапазона дальности, от бесконечности до 10 м, за границы второго изображения выходило максимум 3...7 угловых точек при разворотах в 1° . При угловых разворотах, меньших или равных $0,78^\circ$, угловые точки областей поиска особенностей и, соответственно, все отрезки поиска соответствия, не выходили за границы изображения. Как уже указывалось, рассматривались все возможные сочетания разворотов, т. е. анализировался наихудший случай. Дальнейшее уменьшение областей поиска особенностей с целью увеличения устойчивости алгоритмов по отношению к конструктивно-технологическому разбросу положения камер было признано нецелесообразным, поскольку при этом уменьшается вероятность обнаружения особенностей с хорошими свойствами привязки, что влечет за собой ухудшение надежности процесса установления соответствия.

Вследствие особенностей архитектуры системы, съемка камерами стереопар проходит асинхронно с интервалом времени 5 мс. Поскольку в процессе съемки КА совершает линейные и угловые перемещения, были сделаны оценки ошибок измерения дальности, обусловленных угловым перемещением аппарата, его линейным перемещением, а также суммарные ошибки, обусловленные асинхронностью съемки.

Рассмотрим сценарий посадки ИПМ им. М. В. Келдыша, при котором осуществляется сход с квазисинхронной орбиты (КСО) с упреждением прохождения траверза точки посадки. На рис. 1 приведен график зависимости высоты КА над поверхностью Фобоса от времени. На рис. 2 приведены графики модулей относительных ошибок измерения дальности (высоты), обусловленных угловыми и линейными перемещениями аппарата, а также совместным действием угловых и линейных перемещений. На рис. 3 приведен для сравнения график модуля относительной ошибки измерения дальности (высоты) от времени, обусловленной дискретным характером измерения диспарантности (для точного канала измерений). Из графиков следует, что ошибки, обусловленные асинхронностью съемки, в несколько раз меньше ошибок, обусловленных дискретным характером измерения диспарантности. Таким образом, можно считать, что асинхронность съемки стереопары не приводит к заметному ухудшению точности измерений.

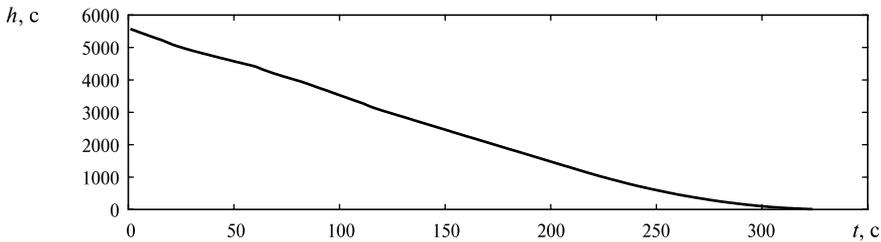


Рис. 1. График зависимости высоты КА над поверхностью Фобоса от времени

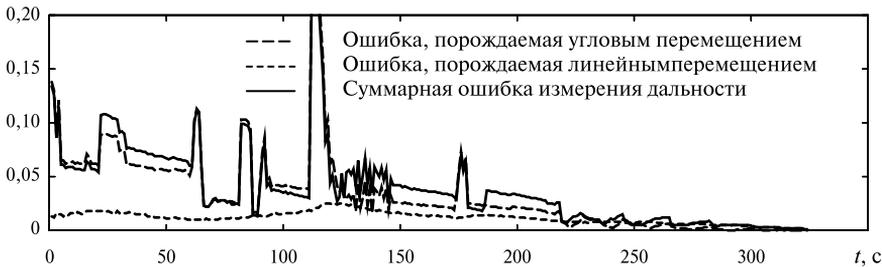


Рис. 2. Графики модулей относительных ошибок измерения дальности (высоты), обусловленных движением КА

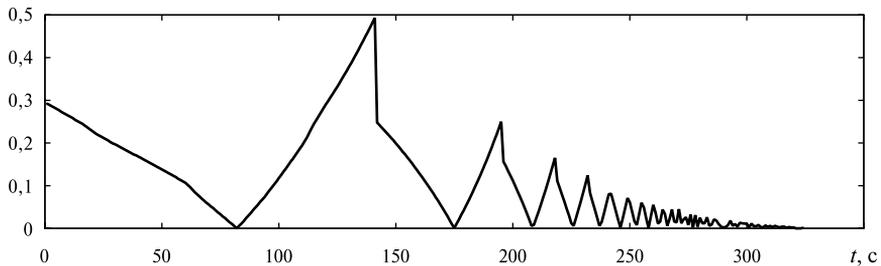


Рис. 3. График модуля относительной ошибки измерения дальности (высоты) от времени, обусловленной дискретным характером измерения диспарантности

Второй сценарий посадки со сходом с КСО при прохождении траверза точки посадки дает приблизительно такие же величины ошибок. Сценарии посадки НПО им. С. А. Лавочкина характеризуются меньшими скоростями сближения с поверхностью Фобоса и гораздо более спокойной угловой динамикой, что обеспечивает меньшие ошибки измерения высоты, обусловленные асинхронностью съемки.

Выводы

В результате анализа полученных результатов был оптимизирован ряд параметров алгоритмов обработки информации в стереорежиме. Получены оценки максимальных ошибок, порожденных конструктивно-технологическим разбросом углового и линейного положения камер. Показано, что нет необходимости вводить поправки в результаты измерений в зависимости от величины дальности и положения точки на кадре. Ошибки, обусловленные асинхронностью моментов съемки, невелики, и ими можно пренебречь.

Литература

- [Гришин, 2008] *Гришин В. А.* Алгоритмы измерения высоты и компонент скорости по телевизионным изображениям при посадке на Фобос // Современ. проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов: Сб. тр. Всерос. научно-технич. конф. Россия, Таруса. 22–25 сент. 2008. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 279–293 (Сер. «Механика, управление и информатика»).
- [Cheng et al., 2005] *Cheng Y., Johnson A., Matthies L.* MER-DIMES: A Planetary Landing Application of Computer Vision // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2005). 2005. V. 1. P. 806–813.
- [Trawny et al., 2007] *Trawny N., Mourikis A., Roumeliotis S., Johnson A., Montgomery J., Ansar A., Matthies L.* Coupled Vision and Inertial Navigation for Pin-Point Landing // Proc. NASA Science and Technology Conf. (NSTC'07). 2007. Paper B2P2.
- [Zhukov et al., 2007] *Zhukov B., Avanesov G., Grishin V., Krasnopevtseva E.* On-Board Real-Time Image Processing to Support Landing on Phobos // Proc. 7th Intern. Symp. “Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations” (RCSGSO). Moscow, Russia. 2007. P. 423–428.

ANALYSIS OF DESIGN-MANUFACTURING SCATTERS OF LINEAR AND ANGULAR CAMERA'S POSITION AND CAMERA'S SHOOT ASYNCHRONICITY ON ALTITUDE MEASUREMENT ERRORS IN STEREO MODE

V. A. Grishin

Space Research Institute (IKI RAN), Moscow

This paper describes the method and analysis results of design-manufacturing scatters of linear and angular camera's position on altitude measurement errors and image processing algorithms in stereo mode. The estimation of degree of influence camera's shoot non synchronism to the altitude measurement errors for the landing scenarios of Keldysh Institute of Applied Mathematics is obtained.

Keywords: spacecraft landing, computer vision system, stereo altitude measuring.

Grishin Vladimir Alexandrovich — senior researcher, PhD, associate professor, e-mail: vgrishin@iki.rssi.ru.

ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА В ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОЦЕНКИ ФОНОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Б. А. Алпатов, А. Б. Фельдман

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Рязанский государственный
радиотехнический университет» (ФГБОУ ВПО «РГРТУ», РГРТУ), Рязань*

Рассмотрен алгоритм измерения координат объекта для бортовых оптико-электронных систем сопровождения, сочетающий в себе преимущества методов сопоставления с эталоном и выделения динамических изменений в видеопоследовательности. Ключевые особенности предлагаемого подхода — учет неравномерности фоновой составляющей, выделение и исключение из рассмотрения изображений посторонних движущихся объектов, внешне схожих с объектом интереса. Эффективность алгоритма измерения координат подтверждена результатами экспериментальных исследований, проведенных с использованием натуральных видеосюжетов.

Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки (Госконтракт № 02.740.11.0002).

Ключевые слова: видеопоследовательность, измерение координат, сопоставление с эталоном, выделение динамических изменений.

Несмотря на значительный прогресс в области создания методов анализа видеопоследовательностей, для решения обзорно-прицельных задач в бортовых оптико-электронных системах на данный момент невозможно указать какой-либо универсальный подход, обеспечивающий выполнение требований к точности и надежности обнаружения, оценки параметров и сопровождения объектов во всем многообразии возможных условий наблюдения. В настоящее время совершенствование методов интеллектуального анализа видеoinформации ведется по двум основным направлениям. Это, во-первых, создание принципиально новых проблемно-ориентированных подходов, позволяющих повысить качество решения определенного спектра задач, таких как, например, обнаружение и сопровождение воздушных объектов на неоднородных облачных фонах или сопровождение существенно протяженных объектов. Во-вторых, актуальным является направление, связанное с созданием комплексных алгоритмов анализа видеопоследовательностей, совмещающих в себе преимущества различных подходов. В частности, в предлагаемой работе рассматривается алгоритм измерения координат объекта интереса, наблюдаемого на неоднородном фоне в присутствии близкорасположенных похожих объектов, сочетающий в себе достоинства методов сопоставления с эталоном и выделения динамических изменений в видеопоследовательностях.

Измерение координат предполагает определение местоположения объекта в текущем кадре видеопоследовательности и является основным этапом решения задач оценки параметров и сопровождения объекта.

Алпатов Борис Алексеевич — заведующий кафедрой автоматки и информационных технологий в управлении, доктор технических наук, профессор, e-mail: aitu@rsreu.ru.

Фельдман Александр Борисович — младший научный сотрудник кафедры автоматки и информационных технологий в управлении, аспирант, e-mail: aitu@rsreu.ru.

Наиболее распространенным на практике способом локализации заданных объектов считается использование методов сопоставления с эталоном. Но при этом, как правило, не принимают во внимание неоднородность фоновой составляющей и возможное присутствие объектов, внешне схожих с объектом интереса. Это, в свою очередь, может приводить к грубым ошибкам измерения координат, влекущим срыв процесса сопровождения. Именно на преодоление указанной проблемы направлена настоящая работа.

Прежде всего, рассмотрим случай, когда в видеоряде присутствует только объект интереса. Если считать фон и объект полностью непрозрачными, атмосферу — полностью прозрачной, однородной и изотропной, то целесообразно воспользоваться моделью вида

$$l(i, j, n) = r(i, j, n)h(i, j, n) + [1 - r(i, j, n)]g(i, j, n) + \xi(i, j, n), \quad (1)$$

где $l(i, j, n)$ — наблюдаемое изображение; i, j — пространственные координаты; n — номер кадра; $h(i, j, n)$ и $g(i, j, n)$ — соответственно текущие изображения объекта и фона; $r(i, j, n)$ — бинарная маска, задающая множество точек объекта; $\xi(i, j, n)$ — пространственно-временной белый гауссовский случайный процесс, обусловленный шумовыми эффектами видеодатчика. Наглядная иллюстрация процесса формирования наблюдаемого изображения представлена на рис. 1.

Изображения объекта $h(i, j, n)$ и фона $g(i, j, n)$ претерпевают определенные трансформации от кадра к кадру. Это связано, во-первых, с изменением условий наблюдения (например, освещенности), во-вторых, с фактором движения объекта относительно фона, в результате которого меняется угловое положение объекта и его ориентация относительно видеодатчика. Ввиду трудности аналитического описания динамики условий наблюдения целесообразно использовать модели состояния яркостей точек объекта и фона вида

$$\begin{aligned} h(u, v, n) &= h(u, v, n-1) + \eta(u, v, n), & (u, v) \in H_n, \\ g(i, j, n) &= g(i, j, n-1) + \omega(i, j, n), & (i, j) \in G_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\eta(u, v, n)$ и $\omega(i, j, n)$ — некоррелированные нормальные процессы, представляющие собой формирующий шум; H_n, G_n — соответственно множества точек объекта и фона в системах координат, связанных с этими изображениями. Надо заметить, что в силу действия аддитивного шума $\xi(i, j, n)$ наблюдению доступны только зашумленные реализации изображений $h(u, v, n)$ и $g(i, j, n)$.

В работах [Алпатов, 1991а, б, 1994] на основании методов оптимального статистического синтеза разработан многоэтапный подход к оцениванию параметров объекта интереса, в котором этап получения измерений ($\tilde{\lambda}_x(n), \tilde{\lambda}_y(n)$) координат объекта представлен алгоритмом

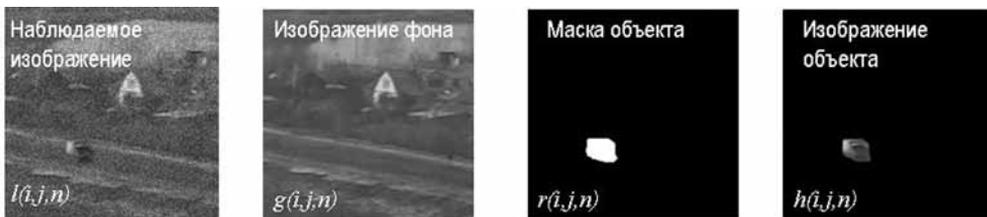


Рис. 1. Элементы модели наблюдения

$$\begin{aligned}
 (\tilde{\lambda}_x(n), \tilde{\lambda}_y(n)) &= \operatorname{arg\,min}_{(\alpha, \beta) \in S(\tilde{\lambda}_x(n), \tilde{\lambda}_y(n), n)} J(\alpha, \beta, n), \\
 J(\alpha, \beta, n) &= \sum_{(i, j) \in H_n} (l(i + \alpha, j + \beta, n) - \bar{h}(i, j, n))^2 - \\
 &- \sum_{(i, j) \in H_n} (l(i + \alpha, j + \beta, n) - \bar{g}(i + \alpha, j + \beta, n))^2.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь $S(\tilde{\lambda}_x(n), \tilde{\lambda}_y(n), n)$ — зона поиска объекта (строб) в текущем кадре с центром в точке прогнозируемого положения объекта $(\tilde{\lambda}_x(n), \tilde{\lambda}_y(n), n)$; $\bar{h}(i, j, n)$ и $\bar{g}(i, j, n)$ — соответственно прогнозируемые изображения объекта и фона, которые, как показано, могут быть найдены при помощи линейного фильтра Калмана

$$\begin{aligned}
 \bar{h}(u, v, n) &= \hat{h}(u, v, n-1), \\
 \hat{h}(u, v, n) &= \bar{h}(u, v, n) + k_g(n)(l(u, v, n) - \bar{h}(u, v, n-1)), \quad (u, v) \in H_n; \\
 \bar{g}(i, j, n) &= \hat{g}(i, j, n-1), \\
 \hat{g}(i, j, n) &= \bar{g}(i, j, n) + k_g(n)(l(i, j, n) - \bar{g}(i, j, n-1)), \quad (i, j) \in G_n.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Последовательность коэффициентов усиления $k_h(n)$ и $k_g(n)$ рассчитывается заранее и подвергается ограничению снизу для отслеживания изменений яркостей. Нетрудно заметить, что критерий (3) учитывает как сходство участка наблюдаемого изображения с эталонным изображением объекта, так и отличие от соответствующего участка фона.

Особенность функционирования бортовых оптико-электронных систем — наличие ракурсных геометрических искажений анализируемой последовательности видеок кадров. В указанных выше работах рассмотрен случай, когда фон может смещаться относительно начала координат неподвижной системы, связанной с видеодатчиком. Показано, что при этом в (3) и (4) необходимо учитывать преобразования координат, а определение местоположения объекта осуществлять совместно с оценкой неизвестной величины смещения фона.

Между тем в большинстве случаев недостаточно описывать характер движения фона только преобразованием смещения. На ограниченном интервале времени при условии наблюдения достаточно удаленной сцены датчиком с узким полем зрения, хорошим приближением к действительности будет использование аффинной модели геометрических искажений, что предполагает описание возникающих деформаций четырьмя параметрами: масштабным коэффициентом, углом поворота изображений и парой координат вектора сдвига.

Нетрудно установить, что непосредственное обобщение рассмотренного выше подхода приводит к необходимости выполнять оптимизацию путем полного перебора в пространстве шести параметров (включая, естественно, координаты объекта), это представляется достаточно трудной задачей даже для современной вычислительной техники. Поэтому предлагается воспользоваться предположением, что изображение объекта занимает достаточно малую площадь кадра, и решать задачи компенсации геометрических деформаций и измерения координат объекта раздельно и последовательно.

Для оценки и компенсации геометрических преобразований предложено немало подходов [Ташлинский, 2000]. Заметим, что высокую практическую эффективность демонстрирует алгоритм, основанный на использовании известных

свойств преобразования Фурье изображений [Reddy, Chatterjee, 1996], а также многоэталонный алгоритм, основанный на выборе и поиске в смежных кадрах некоторой совокупности опорных участков [Стротов, 2009].

Обратимся теперь к проблеме, которая заключается в присутствии в видео-последовательности близкорасположенных к объекту интереса похожих на него объектов. Ясно, что необходимо парировать влияние только подвижных объектов, так как изображения стационарных объектов будут включены в оценку фона. В принципе, возможно организовать однократное выделение таких объектов и дальнейшее слежение за ними на основе методов сопоставления. Но данный путь представляется нецелесообразным, так как приводит к необоснованному увеличению объема вычислений (в частности, ввиду необходимости устранения результатов ложных выделений), а также не исключает возможности перепутывания объектов. Поэтому разумно выделять изменяющиеся участки видеопоследовательности в каждом кадре. При этом в силу того, что предварительно получена оценка фона, требуется введение только одной дополнительной операции — пороговой обработки, не требующей значительных вычислений. Пренебрегая дисперсией оценки, правило выделения динамических изменений можно записать в виде

$$\hat{b}(i, j) = \begin{cases} 1, & |l(i, j, n) - g(i, j, n)| \geq k\sigma_{\xi}(i, j, n); \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где σ_{ξ} — среднеквадратическое отклонение шума $\xi(i, j, n)$; k — коэффициент, определяемый заданной вероятностью ложного выделения. Для улучшения характеристик выделения изменений в условиях случайных геометрических искажений, обусловленных неоднородностью оптической среды, можно воспользоваться подходом, описанным в [Бабаян, 2010].

Таким образом, в целях повышения надежности измерения координат объекта интереса в присутствии близкорасположенных похожих объектов предлагается модифицировать критерий (3) следующим образом:

$$J^*(\alpha, \beta, n) = \sum_{(i, j) \in H_n} (l(i + \alpha, j + \beta, n) - \bar{h}(i, j, n))^2 - \\ - \sum_{(i, j) \in H_n} (l(i + \alpha, j + \beta, n) - \bar{s}(i + \alpha, j + \beta, n))^2,$$

где $s(i, j, n) = \hat{b}^*(i, j, n)l(i, j, n) + [1 - \hat{b}^*(i, j, n)]\bar{g}(i, j, n)$ и \hat{b}^* — результат выделения изменений в текущем кадре, из которого исключены точки, принадлежащие объекту интереса.

Для проверки эффективности предложенного подхода были выполнены экспериментальные исследования, целью которых было сравнение надежности измерения координат при помощи (6) и разностного критерия вида

$$F(\alpha, \beta, n) = \sum_{(i, j) \in H_n} |l(i + \alpha, j + \beta, n) - \bar{h}(i, j, n)|. \quad (7)$$

В ходе экспериментов использовался тестовый набор, состоящий из 58 видеосюжетов, полученных в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Фон представлял собой пересеченный городской ландшафт. Размер объектов интереса на разных сюжетах варьировался от 5×10 до 20×40 элементов разложения.



Рис. 2. Примеры кадров из тестовых видеосюжетов (рамкой отмечен объект интереса)

На ряде сюжетов вблизи объекта интереса наблюдались похожие на него посторонние движущиеся объекты. Примеры кадров из тестовых видеосюжетов представлены на рис. 2. В ходе исследований анализировалось число кадров до срыва слежения N_i , где $i = 1$ для критерия (7) и $i = 2$ для критерия (6). Для непосредственного сравнения алгоритмов использовалась величина $\Delta N = N_2 - N_1$. Экспериментальные исследования, результаты которых представлены в таблице, подтверждают высокую эффективность подхода к измерению координат объекта, основанного на использовании оценки фона и выделении посторонних движущихся объектов.

Результаты экспериментальных исследований

	$\Delta N < -25$	$-25 \leq \Delta N < -5$	$-5 \leq \Delta N \leq 5$	$5 < \Delta N \leq 25$	$\Delta N > 25$
Число сюжетов	2	4	15	1	36

Литература

- [Алпатов, 1991а] Алпатов Б. А. Оценивание параметров движущегося объекта в последовательности изменяющихся двумерных изображений // Автометрия. 1991. № 3. С. 21–24.
- [Алпатов, 1991б] Алпатов Б. А. Алгоритм оценивания местоположения изменяющего яркость объекта в последовательности изображений // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 1991. № 7. С. 76–81.
- [Алпатов, 1994] Алпатов Б. А. Оптимальное оценивание параметров движущегося объекта в последовательности изображений // Автометрия. 1994. № 2. С. 32–37.
- [Бабаян, 2010] Бабаян П. В. Выделение объектов в условиях случайных геометрических преобразований изображения // Автометрия. 2010. № 3. С. 41–47.
- [Стротов, 2009] Стротов В. В. Выбор опорных участков в многоэтalonном алгоритме определения параметров геометрических преобразований изображений // Вестн. Рязанского гос. радиотехн. ун-та. № 2(28). Рязань, 2009. С. 93–96.
- [Ташлинский, 2000] Ташлинский А. Г. Оценивание параметров пространственных деформаций последовательностей изображений / Ульяновский гос. техн. ун-т. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 131 с.
- [Reddy, Chatterjee, 1996] Reddy S., Chatterjee B. N. An FFT-based Technique for Translation, Rotation and Scale-invariant Image Registration // IEEE Trans. on Image Proc. 1996. V. 5. N. 8. P. 1266–1271.

**THE OBJECT LOCALIZATION IN VIDEO SEQUENCES
WITH USAGE OF THE BACKGROUND IMAGE ESTIMATION**

B. A. Alpatov, A. B. Feldman

Ryazan State Radio Engineering University (RSREU), Ryazan

The object localization algorithm for on-board optoelectronic tracking systems is considered, which combines advantages of the methods of template matching and dynamic changes extraction. There are two key features of the offered approach. The first is the taking into account of non-uniform background. The second is extraction and account in further analysis of images of dynamic objects that are similar to the object of the interest. Efficiency of the object localization algorithm is confirmed by results of the experimental researches done with usage of real video.

Keyword: image sequence, object localization, template matching, dynamic changes extraction.

Alpatov Boris — head of the department of automation and information technology in control, doctor of technical sciences, professor, e-mail: aitu@rsreu.ru.

Feldman Alexander — junior researcher of the department of automation and information technology in control, postgraduate student, e-mail: aitu@rsreu.ru.