

На правах рукописи

Блохинов Юрий Борисович

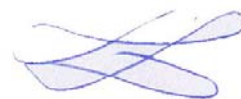
**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АВТОМАТИЗАЦИИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ
ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность:

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва
2011 г.

Работа выполнена в Государственном научно-исследовательском институте авиационных систем (ФГУП ГосНИИАС) и Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Чибуничев Александр Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Журкин Игорь Георгиевич

доктор географических наук, профессор
Книжников Юрий Фирсович

доктор технических наук, профессор
Аковецкий Виктор Геннадьевич

Ведущая организация: Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэрофотосъемки и картографии (ЦНИИГАиК) им. Ф.Н.Красовского

Защита состоится " ____ " _____ 2012 г. в _____ час. На заседании диссертационного совета Д212.143.01 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г. Москва, Гороховский пер., д.4, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “ ____ ” _____

2011г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Краснопевцев Б.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В течение последнего десятилетия потребность в трехмерных цифровых моделях местности (ЦММ) с точки зрения различных технических приложений возросла многократно и для этого есть ряд причин. Прежде всего, значительно расширилась функциональность и техническая база применения ставших уже традиционными географических информационных систем (ГИС) и систем виртуальной реальности. Возникло новое поколение машин, беспилотных летательных аппаратов и автономных наземных роботов с элементами искусственного интеллекта, системы управления которых используют для ориентирования в окружающей среде алгоритмы распознавания на основе цифровых моделей реальных объектов. Еще одним классом систем, связанным с использованием ЦММ, являются быстро развивающиеся и чрезвычайно перспективные экспертные системы, предназначенные для обеспечения ситуационной осведомленности главным образом в чрезвычайных ситуациях и на поле боя. Разнообразие объектов, цифровые модели которых востребованы в различных информационных системах, чрезвычайно велико, от рельефа земной поверхности до зданий городской застройки и отдельных объектов – элементов сцены. Наряду с различными типами серийных домов сюда входят уникальные исторические здания, а также неповторимые произведения искусства, такие, как барельефы и скульптуры. Многочисленные примеры применений такого рода моделей включают в себя детальное документирование, сохранение и воспроизведение материальных предметов культурного наследия, а также использование в образовательном процессе и виртуальном туризме. Автоматизированное построение цифровых моделей таких объектов на основе снимков и опорных данных является задачей и наукоемкой, и весьма актуальной. При этом существенно изменились требования как к качеству моделей, так и к производительности технологий, применяемых для их производства. Понятие «качество» в данном случае включает в себя две составляющие: метрическую

точность предлагаемых моделей архитектурных сооружений и фотографические свойства их текстур.

Основным средством создания ЦММ на основе данных дистанционного зондирования являются цифровые фотограмметрические станции (ЦФС). История их развития начинается с 80-х годов от простых аналогов аналитического плоттера. Современные ЦФС представляют собой гибкий и мощный инструмент, созданный на основе качественно новых технологий и алгоритмов. На протяжении последнего десятилетия были достигнуты большие успехи в области автоматизации основных фотограмметрических процессов: всех видов ориентирования, построении ЦМР, построении ортофото, съемке контуров. Как и ранее наибольшие трудности представляют такие задачи как анализ тонких особенностей рельефа в местах сильных перепадов и съемка контуров искусственных объектов, таких как дороги, здания, мосты и пр. Между тем сегодня в наиболее сложных проектах для достижения наилучшего качества моделей активно привлекаются материалы различных видов съемки: космической, авиационной, наземной. Как результат такого комплексного подхода возникла задача разработки алгоритмов для автоматического анализа стереопар снимков, сделанных с большого базиса, сложность которых заметно превышает аналогичные задачи случая плановой съемки. Можно было бы привести и ряд других новых сложных задач, но их обсуждение выходит за рамки данной работы. Стоит, однако, отметить, что многие из них связаны не с картографией, а с областью инженерной фотограмметрии, которая предъявляет свои особые требования в структуре ЦФС, а также к применяемым в них методам и алгоритмам обработки данных.

Значительный вклад в разработку методов и алгоритмов цифровой фотограмметрии внесли работы Журкина И.Г., Пяткина В.В., Мышляева В.А., Гиммельфарба Г.Л., Гука А.П., Тюфлина Ю.С., Погорелова В.В., Желтова С.Ю., Чекалина В.Ф., Михайлова А.П., Чибуничева А.Г., а также У.Хелавы, Ф.Аккермана, Р.Харалика, Е.Дэвиса, Д.Триндера, Т.Шенка, А.Грюна, Р.Неватиа, Е.Дикманнса, В.Ферстнера и многих других отечественных и

зарубежных ученых. Несмотря на уже достигнутый прогресс проблема автоматизации процессов цифровой фотограмметрии не теряет своей актуальности по причине чрезвычайно динамичного развития этой области информационных технологий и высокой сложности возникающих здесь научных и прикладных задач.

Цель работы состоит в разработке математических методов и алгоритмов, позволяющих значительно повысить степень автоматизации процессов в цифровых фотограмметрических системах. Практической целью работы является разработка цифровых фотограмметрических систем и их реализация на основе созданной алгоритмической базы.

Для достижения цели исследований решаются следующие задачи:

- анализ существующих методов и алгоритмов цифровой фотограмметрии, связанных с обработкой изображений, исследования важнейших свойств этих методов с точки зрения разработки новых и модификации существующих алгоритмов, повышающих их эффективность;
- разработка автоматического метода измерений координат узлов сетки крестов, впечатанных в снимок;
- разработка методов поиска и измерений связующих точек для стереопар снимков с различными геометрическими и фотометрическими характеристиками;
- разработка метода, обеспечивающего автоматическое внешнее ориентирование снимков для опорной информации, представленной в виде цифровых эталонных описаний;
- разработка принципов построения эффективных методов стереоотождествления для произвольно выбранных или информативных точек изображений стереопары;
- разработка методов автоматизированного и автоматического построения моделей типовых зданий;

– создание программных комплексов для обработки произвольного числа стереопар снимков различной геометрии съемки.

Методы исследования: теоретические на основе методов компьютерного зрения, обработки изображений, цифровой фотограмметрии, математической статистики и теории вероятности, оптимизации, линейной алгебры.

Экспериментальные исследования проводились с использованием методов статистического моделирования на реальных цифровых изображениях, полученных различными камерами. Достоверность полученных результатов подтверждена на значительном объеме натуральных данных, обработанных в реальных проектах.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработаны процедуры контроля и отбраковки соответствующих точек изображений на основе пространственных метрических, топологических и стохастических фильтров.
2. Предложен способ выбора и измерения соответственных точек стереопары на основе выделения, описания и сопоставления контуров стереопары, в котором для устойчивого выделения контуров применяется стратегия комбинированного использования характеристик краев и областей изображения. Этот способ существенно повышает надежность отождествления соответственных точек, особенно при обработке малоконтрастных изображений.
3. Предложен метод кодирования маркированных точек, который позволяет надежно сегментировать их на цифровом изображении, вычислять координаты центров с субпиксельной точностью и с высокой степенью достоверности определять уникальный номер, закодированный в структуре по принципу баркода. Симметричная структура круговых меток обеспечивает масштабно-угловую инвариантность алгоритмов распознавания, декодирования и определения координат центров этих меток.

4. Предложен автоматический метод внешнего ориентирования снимков, основанный на применении в качестве опорной информации трехмерных цифровых моделей деталей объекта съемки.
5. Разработаны иерархические методы стереотождествления смешанного типа для произвольно выбранных и информативных точек изображений стереопары, благодаря которым достигается сочетание устойчивости алгоритмов с высокой скоростью генерации точек модели. Применение нерегулярных пирамид сеток позволяет строить оптимальное дискретное представление моделируемой поверхности с учетом ее локальной кривизны.
6. Разработана методика контроля и отбраковки неверно отождествленных точек стереопар для регулярных и нерегулярных моделей поверхности.
7. Предложен способ формального описания модели поверхности тела, ограниченной полигонами. Созданное описание считывается и интерпретируется автоматически при последующей алгоритмической обработке ЦМП объекта в процессе формирования его законченной модели.
8. Разработаны алгоритмы создания оптимизированного текстурного покрытия объекта наземной съемки с использованием полного набора снимков. Все операции полностью автоматизированы.
9. Создана методика автоматического формирования цифровых моделей типовых зданий по одиночным снимкам на основе данных наземной фотосъемки, плана фундамента и дополнительных ограничений на форму здания. Составной частью методики является метод поиска элементов фасада на основе комплексного цифрового эталона. Предложена масштабно-инвариантная модификация метода.

На защиту выносятся:

1. Методика выделения, признакового описания и отбраковки соответствующих точек изображений на основе комбинированного использования пространственных метрических, топологических и стохастических фильтров.

2. Метод автоматического внешнего ориентирования снимков, основанный на применении в качестве опорной информации трехмерных цифровых моделей деталей объекта съемки.
3. Методика построения иерархической структуры стереотождествления смешанного типа для произвольно выбранных или информативных точек изображений стереопары, позволивших значительно повысить как устойчивость алгоритмов, так и скорость генерации точек модели.
4. Методы автоматического контроля и отбраковки неверно отождествленных точек модели поверхности, построенной в результате стереотождествления снимков, для регулярных и произвольных сеток.
5. Методика автоматизированного и автоматического построения цифровых моделей типовых зданий на основе данных наземной съемки и данных альтернативных источников.
6. Цифровые фотограмметрические системы, реализующие теоретические разработки автора по автоматизации фотограмметрических процессов при обработке данных космической, наземной и аэрофотосъемки.

Личный вклад. Все постановки задач в диссертации, их математические формулировки и алгоритмические решения, а также разработка путей технической реализации алгоритмов принадлежит соискателю. Соавторы публикаций принимали участие в разработке алгоритмов и их технической реализации.

Практическая ценность. На основе разработанных методов и алгоритмов был создан ряд отдельных программных компонент, а также программных и программно-аппаратных комплексов, важнейшими из которых являются:

1. Цифровая фотограмметрическая система **Z_Space 2.0**, предназначенная для ориентирования стереопар снимков, генерации цифровых моделей рельефа (ЦМР), создания ортофотопланов, а также съемки векторных контуров на основе стереопар космических снимков ТК-350 (или аэрофотоснимков).
2. Цифровая фотограмметрическая система **Z_Space 3.0**, предназначенная для выполнения блочной фототриангуляции снимков, генерации цифровых

моделей рельефа (ЦМР), создания ортофотопланов, слияния нескольких ЦМР и ортофотопланов, а также съемки векторных контуров на основе блока аэрофотоснимков.

3. Цифровая фотограмметрическая система **Z_Proxima 1.0**, предназначенная для выполнения различных видов уравнивания фотограмметрической сети, построения трехмерных цифровых моделей объектов, а также автоматического текстурирования объектов на основе блока наземных фотоснимков.

Созданное программно-алгоритмическое применялось для решения широкого круга практических задач, таких как:

1. Построение ЦМР и ортофотопланов для производства и обновления топографических карт масштаба 1:50000.
2. Производство высокореалистичных моделей местности для виртуальных авиационных тренажеров и систем синтезированного видения.
3. Создание цифровых моделей местности, зданий и препятствий в зоне аэропортов.
4. Создание и оперативное использования геопространственной информации для повышения ситуационной осведомленности на основе данных наземной и аэрофотосъемки.
5. Построение высокоточных локальных моделей рельефа местности на удаленные и недоступные районы суши Земного шара по материалам космического фотографирования.
6. Создание комплексных цифровых эталонных описаний типовых объектов для систем управления беспилотных летательных аппаратов и наземных автономных роботов с элементами искусственного интеллекта.

Реализация результатов работы. Полученные теоретические и практические результаты использовались при проведении целого ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также при выполнении контрактов, в частности:

- НИР "Феникс-НТ", "Вертел", "Возбудитель-АС", "Стажер", ОКР

"Падишах" и др. выполнявшихся по заказам Министерства обороны РФ в 1995-2010 г.г.

- НИР "Информационные технологии 1996-2000", выполнявшихся по заказам Министерства экономики РФ, Минпромнауки РФ и в соответствии с президентской программой "Национальная технологическая база".

- Контрактов с ЗАО "Совинформспутник" в 1999г. и ООО "Геокосмос 3Д" в 2004г.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались автором на следующих международных конференциях:

- На XI международном симпозиуме "Aerospace. Defense Sensing, Simulation, and Controls". Орландо, Флорида США, 1997;
- На международной научно-технической конференции, посвященной 220-летию со дня основания МИИГАиК, Москва, 1999;
- На XIX конгрессе ISPRS, – г. Амстердам, Голландия, 2000;
- На XX конгрессе ISPRS, – г. Стамбул, Турция, 2004;
- На II международной конференции по фотограмметрии V международного конгресса ГЕОМАТИКА 2007, Куба, Гавана, 2007;
- На XXI конгрессе ISPRS, – г. Пекин, Китай, 2008.
- На международной научно-технической конференции, посвященной 230-летию со дня основания МИИГАиК, Москва, 2009;
- На международной научно-технической конференции "Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы. ИИ-2011", Украина, Крым, Кацивели, 2011.

а также на всероссийских конференциях:

- научно-технической конференции-семинаре «Техническое зрение в системах управления мобильными объектами», Таруса, 2010;
- Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем», Москва, 2011.

Публикации. Содержание диссертации опубликовано в 27 статьях и докладах, основные из которых приведены в списке литературы. Практические приложения содержатся в ряде научных-технических отчетов, выполненных под руководством и при непосредственном участии автора, а также подтверждаются тремя свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы (135 наименований), изложенных на 289 страницах, имеет 161 рисунок, 18 таблиц.

Содержание работы.

Во введении кратко обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована основная цель исследования и вытекающие из неё задачи, приводится краткое содержание работы по главам.

В первой главе рассматривается текущее состояние технологий создания реалистичных трехмерных моделей местностей, а также их место и возможности применения в современной технике. Многочисленные примеры реализации авиационных и других технических систем, так или иначе связанных с использованием цифровых моделей местности (ЦММ), включают в себя авиационные тренажеры, системы синтезированного видения, системы оптимизации трафика в аэропортах, сложные и разнообразные системы повышения ситуационной осведомлённости, которые в качестве составляющих компонент могут включать в себя комплексы оперативного создания геопространственных данных, ГИС-приложения с расширенной функциональностью, а также сетевую геоинформационную поддержку, обеспечивающую удаленное взаимодействие участников в реальном времени. Еще одна качественно новая область применения ЦММ связана с разработкой нового поколения беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов с элементами искусственного интеллекта, системы управления которых могут

использовать для ориентирования в пространстве известные координаты определенных объектов местности.

Основным инструментом для производства ЦММ на основе данных дистанционного зондирования являются цифровые фотограмметрические станции (ЦФС). Официально о появлении цифровых фотограмметрических станций впервые было объявлено на XVI конгрессе ISPRS 1988 года в Киото. В то время многие видели в ЦФС лишь аналог аналитического плоттера, выполненный на новом оборудовании главным образом для ручных измерений, некоторые исследователи уверяли, что в ближайшем обозримом будущем большинство операций будут выполняться автоматически, причем с очень высокими скоростями. И лишь немногие предвидели развитие качественно новых гибких технологий и алгоритмов на основе цифровой техники и программного обеспечения. Однако уже на этом этапе намечаются те основные тенденции развития ЦФС, которые в последующее десятилетие уведут их неизмеримо далеко от прототипа - аналитических систем:

- Использование множества перекрывающихся снимков вместо двух для построения ЦМР.
- Развитие средств самодиагностики внутри автоматических модулей.
- Интегрирование ЦФС и ГИС.
- Переход на цифровые снимки особенно с появлением Интернета.
- Прямое использование GPS-измерений в ориентировании.
- Использование данных от лазерного сканера при построении ЦМР.
- Широкое использование моделей сенсоров нецентральной проекции, а также сенсорно независимых аппроксимаций уравнений коллинеарности, таких как рациональные полиномы.
- Растущая интеграция панхром и мультиспектральных снимков, особенно в автоматизируемых процессах.

Также к этому времени уже практически сложилась схема типового рабочего процесса ЦФС.

Первое крупное официальное подведение итогов развития цифровой фотограмметрии относится к 1996 году и связано с XVIII конгрессом ISPRS в Вене. Сравнение ЦФС производилось главным образом по реализации основных фотограмметрических функций: набору обрабатываемых сенсоров, фотограмметрической триангуляции, построению ЦМР, построению ортофото, съемке контуров. Всякая оценка прогресса ЦФС, несомненно, должна основываться на достигнутой степени их автоматизации, поскольку именно это качество отличает ЦФС от фотограмметрических устройств предыдущих поколений. На момент 1996 года автоматизация процессов явно находится в начальной фазе развития и особенно это касается съемки контуров. Поражает огромный разрыв между размахом и успехами исследовательских изысканий и тем, что реально может быть использовано в коммерческом продукте. Однако необходимо отметить, что небывалый всплеск исследовательской активности этого периода привел к успеху в решении многих задач, которые можно было бы назвать вспомогательными: выделение краев, снейки, наращивание областей, оконтуривание прямоугольников, связывание и утончение границ, обнаружение выбросов и др. В результате коммерческие ЦФС получили полезные автоматизированные инструменты для измерения зданий, съемки контуров, измерения площадей и решения других полезных задач. Проведенные испытания показали увеличение производительности по сравнению с ручным способом в 2-4 раза при значительно меньшем утомлении человека. Во всех случаях методы анализа и обработки изображений используются для улучшения, уточнения информации, введенной оператором. При этом эффективно используется математическая модель данного объекта - в итоге для каждого объекта проектируется наиболее подходящий ему инструмент.

Подводя итоги развития фотограмметрии за последние полтора десятилетия, можно сказать, что цифровая технология позволила решить большинство задач, которые на нее возлагали. Достигнуты большие успехи в области автоматизации всех процессов, но ни в одной из лучших мировых ЦФС

не достигнута полная автоматизация, что говорит об исключительной сложности решаемой задачи. Оптимизм в этом вопросе связан, прежде всего, с тем, что уже имеющиеся результаты позволили совершить настолько значительный качественный скачок в развитии ЦФС, что очевидно цель стоила потраченных усилий. Другим важным аспектом обсуждаемой проблемы является то обстоятельство, что достигнутые успехи порождают новые возможности и новые сложные задачи, пути решения которых связаны с развитием как *цифровой фотограмметрии*, так и методов *анализа и обработки изображений*.

В следующих разделах диссертационной работы представлены методы автоматизации основных фотограмметрических процессов для космической, авиационной и наземной съемки.

Во второй главе излагается автоматическое внутреннее ориентирование снимков для случая, когда координатные метки представлены в виде сетки крестов, впечатанных в снимок. Примерами таких снимков могут служить космические снимки ТК-350 и некоторые аэроснимки. Отличительной особенностью предлагаемого алгоритма является его способность надежно и с субпиксельной точностью находить кресты на изображениях, имеющих большую контурную нагрузку, блики и высокий уровень шумов.

Для поиска крестов используется сенсорная пара в виде двух цифровых матриц S^+ и S^- специального вида, согласованного с формой креста:

$$S^+ = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & | & 0.0 & | & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & | & 0.0 & | & 1 & 1 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 0.0 & | & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 0.0 & | & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 1 & | & 0.0 & | & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & | & 0.0 & | & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad S^- = - \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & | & 1.1 & | & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 1.1 & | & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 1 & | & 1.1 & | & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & | & 1.1 & | & 1 & 1 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1.1 & | & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & | & 1.1 & | & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Результирующая матрица получается как разница сверток $(1/w_+)*S^+$ и $(1/w_-)*S^-$ с областью поиска. Весовые коэффициенты w_+ и w_- равны числу единиц в матрицах S^+ и S^- . Положения локальных максимумов в результирующей матрице являются кандидатами на положение центра креста.

В качестве предобработки изображения применяется гистограммная обработка фрагментов с пороговым отсечением яркости по гистограмме. Показано, что этот прием эффективен в ситуациях, когда максимумы от бликов оказываются сильнее максимума от самого креста. Результаты поиска проходят проверку в соответствии с критерием, учитывающим характерную форму функции отклика креста на сенсорную пару в виде острого пика, резко уменьшающегося в диагональных направлениях

$$D = (Im(j,i) - 1/4 \sum_{k=-2,2} \sum_{l=-2,2} Im(j+k, i+l)) / Im(j,i),$$

где j, i - положение максимума. Если $D < D_{th}$ (пороговая величина), то локальный максимум отбрасывается.

Для ускорения вычислений каждый крест ищется в определенной области. Положение всех крестов прогнозируется по положению трех крестов, задаваемых пользователем: начальным крестом, соседним справа и соседним снизу. Область поиска задается по формуле

$$L = \pm s * \sqrt{x_L^2 + y_L^2},$$

где x_L и y_L - расстояние от предполагаемого положения определяемого креста до первого креста, заданного пользователем; s - задаваемый коэффициент.

Эталонная сетка представляется в виде регулярной сетки с величиной ячейки $L_{pix} = L_{mm} * D_{mm}$, где

L_{mm} - паспортное значение шага сетки,

D_{mm} - размер пиксела цифрового изображения.

$$x_{ei} = i * L_{pix},$$

$$y_{ej} = j * L_{pix}.$$

Определяются параметры обобщенного ортогонального преобразования (перенос - dx, dy , поворот - α , растяжение - k), переводящие найденные кресты к положению, наиболее близкому к эталонному по критерию наименьших квадратов расстояний. Величина $k * D_{mm}$ предлагается в качестве уточненного значения размера пиксела цифрового изображения. Значения Δx_i и Δy_i используются как критерии искажения исходного изображения.

$$\Delta x_i = x_{ei} - x_{ri}, \quad x_{ri} = x_{fi} \cdot \cos(\alpha) - y_{fi} \cdot \sin(\alpha) + d_x,$$

$$\Delta y_i = y_{ei} - y_{ri}, \quad y_{ri} = y_{fi} \cdot \cos(\alpha) - x_{fi} \cdot \sin(\alpha) + d_y,$$

Для субпиксельного уточнения положения центров впечатанных крестов используются пересечения прямых, являющихся вертикальными и горизонтальными границами крестов. Для их позиционирования вычисляются координаты пересечения нуля второй производной яркости на основе фильтра Марра. По точкам, определяющим верхнюю и нижнюю границу горизонтальной составляющей, строятся по методу наименьших квадратов две прямые. По полученным двум линиям находится усреднённая линия, которая и будет наиболее точно описывать горизонтальную часть креста:

$$a = (a^1 + a^2)/2,$$

$$b = (b^1 + b^2)/2.$$

Аналогично строится вертикальная прямая. Центр креста определяется как пересечение этих двух линий по формуле:

$$x := -\frac{b_1 + a_1 \cdot b_2}{a_1 \cdot a_2 - 1}, \quad y := a_2 \cdot x + b_2,$$

где a_1 , b_1 , a_2 , b_2 – коэффициенты вертикальной и горизонтальной центральных прямых, записанных в виде:

$$x = a_1 \cdot y + b_1, \quad \text{для вертикальной прямой,}$$

$$y = a_2 \cdot x + b_2, \quad \text{для горизонтальной прямой.}$$

Полученные таким образом координаты крестов используются для вычисления параметров внутреннего ориентирования и трансформирования снимков.

Третья глава посвящена разработке методики автоматической генерации связующих точек для стереопар снимков, отличающихся по условиям съемки и содержанию изображенных сцен. Прежде всего, формулируются общие требования, которым должны удовлетворять процедуры автоматического взаимного ориентирования:

- Возможность автономной работы без участия оператора.

- Более высокая продуктивность по сравнению с ручным ориентированием.
- Более высокая точность по сравнению с ручным ориентированием.
- Возможность работы со снимками независимо от применяемой камеры и масштаба съемки.
- Независимость от информативности сцен, изображенных на снимках.
- Возможность работы со снимками разного качества.
- Наличие внутренних процедур контроля и отбраковки неправильно выбранных связующих точек.

С учетом этих требований разработаны все основные алгоритмы методики генерации связующих точек. Методика включает в себя методы выделения характерных примитивов изображения, а также алгоритмы последующего анализа и обработки, которые позволяют на их основе сгенерировать конечный набор связующих точек, удовлетворяющий ряду дополнительных условий. Рассматриваются три вида примитивов: *точки, контуры и области*, проведен сравнительный анализ их существенных свойств и показано, что *точки* являются наилучшим выбором для решения задачи взаимного ориентирования.

Основным преимуществом использования характерных точек изображения в качестве исходных примитивов для выделения связующих точек являются относительная простота используемых алгоритмов и субпиксельная точность позиционирования при формировании пар точек. Алгоритмы этой группы отличает также достаточно высокая скорость вычислений по сравнению с алгоритмами обработки других видов примитивов. Выделение характерных точек производится с помощью «операторов интереса». В работе показано, что выбор операторов интереса и дескрипторов точек должен опираться на учет специфики наземных, космических и аэрофотоснимков, на их геометрические и фотометрические характеристики.

Существенными особенностями *аэрокосмических* снимков являются:

1. Относительно небольшие геометрические искажения.
2. Ограниченные изменения параллаксов.

3. Относительно высокий уровень шумов (для космических снимков).
4. Большие размеры обрабатываемых снимков.

Существенными особенностями наземных снимков являются:

1. Значительные геометрические искажения фрагментов.
2. Произвольная глубина сцены и как следствие большой диапазон параллаксов.
3. Объектами съемки, как правило, являются искусственные объекты с очень специфическими текстурами.
4. Относительно небольшие размеры снимков.

В результате проведенных исследований предложены обоснованные решения для аэрокосмических и наземных снимков. Для работы с низкоинформативными естественными текстурами был разработан оператор интереса, использующий адаптивную оценку дисперсии яркости изображения

$$\sigma_N^2(x_0, y_0) = \frac{1}{N^2} \sum_{x=-N/2}^{N/2} \sum_{y=-N/2}^{N/2} f^2(x+x_0, y+y_0) - \left(\frac{1}{N^2} \sum_{x=-N/2}^{N/2} \sum_{y=-N/2}^{N/2} f(x+x_0, y+y_0) \right)^2$$

где $f(x, y)$ - функция яркости фрагмента, N - размер окна. Отличительной особенностью работы данного оператора является достаточная плотность распределения точек по всей площади изображения даже в случае отсутствия на снимках четких контуров и резких перепадов яркости. Для наземных снимков показано, что поиск характерных точек целесообразно проводить с применением нескольких различных операторов интереса.

Выделенные точки интереса включаются в списки, содержащие очень большое, избыточное число точек. Для первоначального их сопоставления вводится N -мерное пространство численных признаков (дескрипторов), которое может формироваться различными способами. Общие естественные требования к выбору дескрипторов включают в себя свойства инвариантности к геометрическим и фотометрическим преобразованиям изображения. К геометрическим преобразованиям относятся вращение, изменение масштаба и перспективные искажения. Однако до сих пор универсального набора

дескрипторов, оптимального для всех случаев не существует, поэтому решение заключается в выборе наилучшего для определенного круга задач.

Для работы с аэрокосмоснимками в качестве дескрипторов были выбраны алгебраические инварианты X_u , обладающие инвариантностью по отношению к вращению. Исследование вопроса о влиянии *формы окна* на результат отбора соответствующих пар точек показало преимущество окна круглой формы, которое при углах поворота, близких к 45 градусам может составлять увеличение числа верно отождествленных точек до 50%.

Особенностям изображений наземной съемки наиболее отвечают свойства инвариантов Флюссера, которые представляют собой комплексные моменты:

$$c_{pq} = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} (x+iy)^p (x-iy)^q f(x,y) dx dy,$$

где i – мнимая единица, $f(x,y)$ нормализованная яркость фрагмента. При этом производится предварительная нормализация яркости фрагментов, что позволяет компенсировать эффект разной освещенности. Здесь, при наличии значительных перспективных искажений применяется эллиптическое окно, дающее увеличение числа верно отождествленных точек до 30%.

Задача вычисления дескрипторов точек интереса, так или иначе, связана с решением вопроса об объеме выборки, по которой они вычисляются. поскольку при вычислениях любых точечных характеристик реально мы имеем дело не с точкой, а с конечной ее окрестностью (окном), центром которой является данная точка. С этой целью предложен метод выбора размера окна на основе концепции информативного размера точки. В качестве вычислительно простого и эффективного показателя локальной информативности изображения рассматривается дисперсия яркости σ_N^2 . Поведение функции роста дисперсии яркости при увеличении размеров окрестности позволяет определить размер окна, при котором достигается максимальное значение дисперсии. В качестве *информативного размера I точки* принимается абсцисса максимального значения функции σ_N^2 , т.е. размер окрестности при котором показатель

неоднородности максимален. Важным свойством определенного таким образом информативного размера I является то, что при изменении масштаба изображения он изменяется пропорционально масштабу и для соответствующих точек двух изображений должно выполняться условие:

$$I(x_l, y_l) = k \cdot I(x_r, y_r),$$

где $I(x_l, y_l)$ - информативный размер точки (x_l, y_l) эталонного изображения; k - коэффициент расхождения масштабов изображений; $I(x_r, y_r)$ - информативный размер точки (x_r, y_r) эталонного изображения. Это свойство эффективно использовалось для оценки отличия масштабов сравниваемых изображений

Первичный отбор соответствующих точек осуществляется путем выбора нескольких кандидатов, ближайших к рассматриваемой точке в N -мерном пространстве признаков, порожденном набором дескрипторов. Для оценки близости использовалось расстояние Махаланобиса:

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{y})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{y})},$$

где \mathbf{x} и \mathbf{y} векторы инвариантов сравниваемых фрагментов изображений, \mathbf{C} - матрица ковариации:

$$C_{ij} = \text{cov}(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j) = E[(\mathbf{X}_i - \mu_i)(\mathbf{X}_j - \mu_j)],$$

\mathbf{X}_i - вектор значений k -го дескриптора для всех рассматриваемых точек в обоих изображениях, $\mu_i = E(\mathbf{X}_i)$ - среднее значение (математическое ожидание) k -го инварианта, $i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N$.

Локальные показатели примитива изображения не дают его достаточно полного описания. Вследствие этого возможны ошибки в идентификации точек на основе учета только индивидуальных их характеристик. Поэтому необходимо принимать в рассмотрение также и пространственные соотношения между данной точкой и соседними примитивами изображения. Фильтрация исходного набора кандидатов с учетом пространственных отношений элементов (примитивов) изображения позволяет значительно повысить надежность идентификации. Таким образом, задача стерео отождествления двух точек включается в более общую задачу стерео

отождествления двух изображений. В работе рассматриваются три типа пространственных фильтров: *метрический*, *топологический* и *стохастический*.

В алгоритме *метрической* фильтрации вычисляются расстояния между всеми точками сравниваемых изображений. Расстояния между точками могут быть записаны в форме матрицы \mathbf{A} размером $N \times N$:

	A_1	A_2	...	A_i	...	A_N
A_1	0	r_{12}	...	r_{1i}	...	r_{1N}
A_2		0	...	r_{2i}	...	r_{2N}
...		
A_i				0	...	r_{iN}
...				
A_N						0

где $r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ – евклидово расстояние между точками A_i и A_j , (x_k, y_k) – координаты точки A_k . Для определения соответствий между N точками необходимо сравнить матрицы \mathbf{A}^L и \mathbf{A}^R , построенные для двух изображений.

Существенным ограничением здесь выступает требование отсутствия больших геометрических искажений изображения, при котором расстояния между парами точек могут сильно меняться. Однако требование ограниченности параллаксов обычно выполняется для большинства стереопар космических и аэрофотоснимков. В то же время, эти снимки часто отличаются большими размерами, и фактор времени автоматической обработки в этом случае становится критическим. Поэтому метрический фильтр успешно применяется при анализе изображений, полученных способом аэрокосмической съемки.

Топологические отношения между точками более устойчивы к трансформациям изображений. На идее сохранения циклического порядка точек основан метод топологической фильтрации. Для тройки произвольных точек (R_1^1, R_1^2, R_1^3) изображения V_1 , не лежащих на одной прямой, и соответствующей ей тройке точек (R_2^1, R_2^2, R_2^3) изображения V_2 функция

$$side(R_v^1, R_v^2, R_v^3) = \text{sgn} \left(\det \begin{bmatrix} x_v^3 - x_v^2 & x_v^1 - x_v^2 \\ y_v^3 - y_v^2 & y_v^1 - y_v^2 \end{bmatrix} \right)$$

принимает значение -1 , если R_v^1 лежит по правую сторону от вектора, направленного из R_v^2 в R_v^3 , или значение 1 , если эта точка лежит по левую сторону от него. Таким образом, соотношение

$$side(R_1^1, R_1^2, R_1^3) = side(R_2^1, R_2^2, R_2^3)$$

означает, что точка R_1^1 и её аналог R_2^1 лежат по ту же сторону от вектора на обоих изображениях. В случае его нарушения можно сделать вывод о неверной привязке одной из точек тройки. Рассмотрев все возможные тройки, можно найти точки, которые с большей вероятностью, чем остальные, привязаны неверно. Несмотря на большую универсальность топологического принципа по сравнению с метрическим, при широкобазисной съемке объектов возможны ситуации, когда и он нарушается.

Метод *стохастической* фильтрации в задаче поиска соответствий на изображениях стереопары использует наиболее общую модель, задаваемую эпиполярной геометрией съемки в центральной проекции. Общую задачу определения параметров модели по имеющимся данным можно записать следующим образом. Требуется определить вектор параметров θ^* такой, что

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} F(\Omega, \theta),$$

где $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N\}$ – вектор наблюдений, $F(\Omega, \theta)$ – функция, которая определяет используемую математическую модель. В данном случае модель задана эпиполярным преобразованием. Алгоритм решения задачи робастной оценки параметров RANSAC (RANdom SAmple Consensus) определяет параметры модели за счет поиска наилучшей гипотезы θ среди множества всех возможных гипотез Θ , порожденных исходными данными, при этом выборки исходного множества генерируются случайным образом. После построения и оценки всех порожденных гипотез из них выбирается гипотеза

$$\theta_{opt} = \arg \max_{\theta} f(\Omega, \theta)$$

с наилучшей степенью согласия, которая принимается за результат робастной оценки. Сочетание топологических фильтров с фильтрами на основе RANSAC позволяет реализовать чрезвычайно эффективную схему отбора пар

соответствующих точек в достаточно широком диапазоне базисов съемки при большом разнообразии вариантов снимаемых сцен. Высокая надежность такой схемы в сочетании с относительно высокими временными затратами на реализацию, определяют целесообразность ее использования для автоматизации задач наземной фотограмметрии, в которой условия съемки сложны, но размер снимков как правило невелик.

После формирования набора связующих точек производится уточнение их координат методом *субпиксельной* корреляции.

Для тестирования разработанной методики автоматической генерации связующих точек в системах аэрокосмической и наземной фотограмметрии, был отобран ряд стереопар цифровых снимков, сделанных разными камерами в разных условиях. Выбор стереопар определялся требованиями наибольшей вариативности представленных данных в смысле геометрических и фотометрических характеристик изображений. При оценке точности используемых алгоритмов производилось их сравнение с результатом ручных измерений. Результаты убедительно продемонстрировали превосходство автоматического способа измерений, показав во всех случаях его более высокую точность и значительно более высокую производительность.

В разделе 7 данной главы проведено исследование возможности применения *контуров* для взаимного ориентирования изображений. Разработан метод выбора и измерения соответственных точек стереопары на основе выделения, описания и сопоставления контуров стереопары, включающий следующие этапы:

1. Выделение контуров. Для создания робастного метода выделения контуров на реальных изображениях, предложен подход, при котором эффект достигается за счет использования информации, полученной от сопоставления независимых контуров и контуров-границ областей.
2. Для отождествления контуров в одномерном представлении «длина дуги X – кривизна» разработан метод сравнения на основе метода динамического программирования. Для этого вводится мера сходства двух контуров

$\bar{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ и $\bar{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$, как наибольшая стоимость соответствия упорядоченной выборки Υ пар особенностей этих контуров:

$$W(\bar{A}, \bar{B}) = \max_{\Upsilon} \sum_{(i,j) \in \Upsilon} w(A_i, B_j) + \sum_{i \notin \Upsilon} p(A_i) + \sum_{j \notin \Upsilon} p(B_j),$$

где $w(d) = \begin{cases} 1, d < L1 \\ \frac{L2-d}{L2-L1}, d > L1 \end{cases}$ – функция стоимости сравнения, $d(A_i, B_j) = \frac{|A_i - B_j|}{\max(A_i, B_j)}$

- функция сходства особенностей, $p(A_i) = 0$ – штраф за пропуск особенности.

Метод дополняется постобработкой отобранных пар по функции стоимости сопоставления отрезков по относительным длинам

$$w_{dist}(L, R) = \sum_i w \left(d \left(\frac{|x_{i+1}^L - x_i^L|}{\sum_i |x_{i+1}^L - x_i^L|}, \frac{|x_{i+1}^R - x_i^R|}{\sum_i |x_{i+1}^R - x_i^R|} \right) \right)$$

где L – контур на левом изображении, R – контур на правом изображении.

Именно применение гибкого метода ДП позволило добиться устойчивого результата при сравнении таких сложных объектов как контуры, нивелируя при этом мелкие вариации многих факторов, включающих изменение условий освещённости и ракурсов съёмки, тени, загораживания, а также погрешности сегментации.

3. Для координатной привязки отождествленных контуров и измерения соответственных точек изображения разработан и реализован метод, использующий схему «голосования» точек контура в соответствии с построенной референсной таблицей и последующим сглаживанием аккумулятора с гауссовским ядром.

Разработанный метод выбора и измерения соответственных точек стереопары на основе контуров создает возможность измерения соответственных точек при обработке изображений со слабо выраженными текстурами, когда использование точечных операторов интереса принципиально затруднено.

Четвертая глава посвящена решению проблемы распознавания опорных точек для внешнего ориентирования снимков на основе их цифровых

эталонных описаний. Вводится определение эталонного описания (ЭО) как совокупности данных, позволяющей достаточно полно описать признаки объекта на изображении и ориентированной на применение конкретного алгоритма или класса алгоритмов. В общем случае ЭО может включать фрагменты полутоновых или бинарных изображений, числовые параметры, текстовую информацию. В данной главе рассматриваются решения задачи распознавания опорных точек для ЭО двух типов: *кодированных меток* и *трехмерных цифровых моделей деталей сцены*.

Кодированные метки используются для автоматизированной калибровки фотокамер или выполнения высокоточных 3D измерений поверхности. ЭО кодированных меток, как правило, представляют собой бинарные изображения, дополненные текстовым описанием. В данной работе рассматривается методика автоматизированного дистанционного измерения координат, основанная на использовании круговых меток двух типов (рис.1):



Рис. 1 - Кодированные метки

Первый тип меток (простые метки) имеет форму кольца с белым кругом в центре. Все метки данного типа идентичны. Второй тип (кодированные метки) представляет собой циркулярный штриховой код, свойства которого подчиняются следующим правилам:

1. Циркулярный штриховой код кодирует целые числа от 1 до 9.
2. Все ширины кратны некоторому значению X , называемому модулем. Центральный круг имеет радиус $2X$, радиус символа кода равен $10X$.
3. Кодирование любого целого числа от 1 до 9 в набор колец производится по простым формулам.

4. Работоспособность алгоритма обеспечивает нормальное разрешение колец до ширины модуля на изображении не менее 1,5 пикселей.

Калибровка производится по снимкам тест-объекта с нанесенными на его поверхность метками, полученных с известных ракурсов и расстояний. Для решения задачи применяются алгоритмы анализа и обработки изображений: сегментация, поиск меток по признакам в соответствии с ЭО (площадь, длина-ширина, структура (центр-углы), вложенность, инварианты эллипса), выделение границ меток, вычисление координат центров, идентификация и декодирование меток.

На основе разработанных алгоритмов было создано программное обеспечение автоматической калибровки камер. Анализ данных тестирования подтвердил высокую эффективность созданной методики.

Цифровые модели (ЦМ) технических объектов и сооружений, как правило, существуют могут быть созданы на основе их чертежей. Для решения задачи внешнего ориентирования снимков таких объектов можно выбрать в качестве опорной информации характерные узлы объекта, а ЭИ этих узлов для заданного набора параметров ориентирования сгенерировать на основе ЦМ. Предполагается, что приблизительные значения элементов внешнего ориентирования (ЭВО) известны, например, из анализа навигационных данных. ЭО в этом случае включает в себя ЭИ и приблизительные значения ЭВО.

В качестве примера такого рода рассматривается задача разработки телевизионной измерительной системы для управления движением и навигации перспективной пилотируемой транспортной системы Международной космической станции, одной из основных задач которой является измерение параметров относительного положения при сближении космических аппаратов. Измерение выполняется на основе снимков единственной камеры, установленной на транспортном корабле при условии откалиброванной съемочной системы. Существенной особенностью предложенных опознаков является их трехмерность. Технология использования трехмерных опознаков

предполагает, что сначала на их основе генерируются двумерные ЭИ узлов, затем производится их поиск на текущем изображении (ТИ).

Для решения задачи поиска наиболее вероятного положения объекта на изображении разработан иерархический алгоритм сопоставления ЭИ и ТИ, включающий следующие этапы:

- предварительная обработка ТИ, позволяющая устранить или снизить интенсивность шумов различного происхождения;
- построение поля градиентов яркости ТИ и ЭИ;
- нахождение набора наиболее вероятных положений каждого объекта сцены на основе анализа поля градиентов;
- сборка сцены, выбор главного максимума, оценка значений координат объекта;
- в качестве координат отдельно узла используются координаты одной из его характерных точек, выбранной на эталоне.

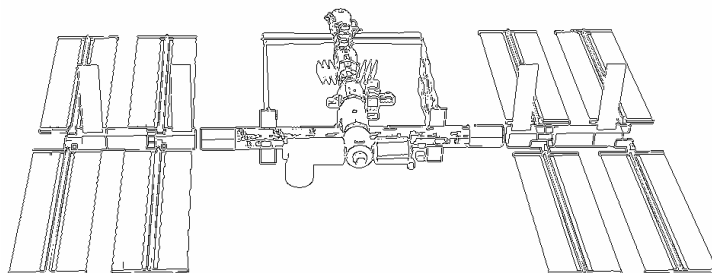


Рис. 2 - Эталонное изображение МКС

В каждой точке контура ЭИ узла вычисляется направление градиента:

$$R_E(i, j) = \arctg(E_y / E_x),$$

где E_x и E_y – составляющие градиента вдоль осей x и y , для ТИ также вычисляются значения $R_I(i, j)$. В каждом положении контурного эталона, определяется функция отклика

$$D(m, n) = \sum_{\substack{i \in [m, m+H_E] \\ j \in [n, n+W_E]}} p(i, j), \quad p(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } |R_I(i, j) - R_E(i, j)| < T \\ 0, & \text{в других случаях} \end{cases}$$

где H_E и W_E – высота и ширина эталонного изображения.

С целью эффективного подавления ложных максимумов и повышения устойчивости алгоритма поиска в работе реализован так называемый структурно-лингвистический подход, позволяющий учитывать информацию о взаимном расположении объектов сцены в качестве дополнительных ограничений. В процессе сборки сцены из отдельных узлов производится аккумуляция значений функции сходства текущего изображения с каждым контурным эталоном в одну агрегированную функцию сходства

$$D_{осн}(m_k) := \max(D_{осн}(m_k), \max_{\mathbf{r}} D_n(\mathbf{r})), \mathbf{r} \in S_n(m_k),$$

$S_n(m_k)$ - область поиска. Показано, что процедура сборки не только подавляет ложные, но и усиливает главный максимум. Для количественной оценки надежности главного максимума используется численный показатель, равный отношению величины глобального максимума функции сходства к следующему по величине локальному максимуму:

$$Q_{приц} = \frac{\max_{S_{приц}} D_{приц}}{\max_{S_{приц} \setminus R} (D_{приц})}.$$

В заключение показано, что применение структурно лингвистического анализа, существенной частью которого является процедура сборки сцены, обеспечивает высокую надежность распознавания отдельных узлов в составе сцены. Проведенное численное моделирование показало также устойчивость предложенных алгоритмов в достаточно широком диапазоне углов наблюдения сцены.

В пятой главе рассмотрена задача создания эффективного метода построения цифровой модели рельефа (ЦМР) путем стереотождествления соответствующих точек стереопары изображений аэрокосмических снимков. С учетом сложности поставленной задачи проведен анализ особенностей аэрокосмических снимков и проблем, которые они могут вызвать при стереотождествлении. К наиболее существенным особенностям относятся:

- Яркостные различия изображений стереопары, возникающие при съемке поверхностей объектов под разными углами.
- Геометрические искажения, возникающие при съемке под разными углами и вызванные рельефом местности.
- Наличие на изображениях областей с малой вариацией яркости.
- Высокий уровень шумов (для космических снимков).
- Большие размеры снимков, необходимость отождествления большого количества точек.

В результате предложен метод, сочетающий высокую устойчивость к шумам и ошибкам начального приближения, высокую скорость генерации ЦМР, а также автоматическое выявление и коррекцию ошибок стереотождествления. Характерными чертами разработанного метода являются:

1. Использование нормированного коэффициента корреляции в качестве меры сходства образов.
2. Использование пирамиды изображений и пирамиды ЦМР для увеличения быстродействия и для обеспечения более надежного отождествления.
3. Автоматическая постобработка ЦМР с целью отбраковки выбросов и восполнения недостающих вершин.
4. Тонкая коррекция ЦМР на основе дифференциального ортофото.

По применяемым для стереотождествления примитивам метод является площадным, корреляционным и основан на поиске максимума нормированной КФ

$$k(\mathbf{p}) = \frac{\sum_{(x,y)} f(x,y)g(x_1,y_1) - N\bar{f}\bar{g}}{(\sum_{(x,y)} f^2(x,y) - N\bar{f}^2)^{1/2}(\sum_{(x,y)} g^2(x_1,y_1) - N\bar{g}^2)^{1/2}}$$

Для каждого эталона, выбранного на левом изображении, на всех уровнях пирамиды изображений, представляющей собой последовательность N уменьшенных вариантов исходного изображения, решается задача стереотождествления:

$$(a^*, b^*)_i = \operatorname{argmax}_{a, b \in R_i} k(a, b), \quad i = N, \dots, 1$$

где R_i - прямоугольная область изменения значений параметров сдвига, которая на верхнем уровне пирамиды оценивается с использованием эпиполярной геометрии и диапазона изменения высоты рельефа, а на более детальных уровнях используется начальное приближение, полученное с предыдущих уровней. Для увеличения точности начального приближения вычисляются субпиксельные координаты максимума корреляционной функции с помощью вычисления координат центра тяжести функции в окрестности ее максимума. При этом на N -ом уровне площадь области поиска сокращается в $(2^{N-1})^2$ раз:

$$R_N = \left\{ (x, y) : \frac{x_{\min}}{2^{N-1}} \leq x \leq \frac{x_{\max}}{2^{N-1}}, \frac{y_{\min}}{2^{N-1}} \leq y \leq \frac{y_{\max}}{2^{N-1}} \right\}.$$

Для увеличения надежности и скорости стереотождествления в работе предложен метод построения ЦМР с помощью *иерархической стратегии*, при которой наряду с пирамидой изображений создается также и *пирамида ЦМР* с разным разрешением. По начальному приближению локально оцениваются характеристики ЦМР, такие как диапазон высот, наклон поверхности. Эти параметры используются для построения более детальной ЦМР, что значительно сокращает общее время построения ЦМР, а также уменьшает погрешности, которые возникают, когда параметры ЦМР известны грубо.

Результатом применения пирамид изображений и пирамид ЦМР является ускорение метода более чем в 15 раз.

Высокая надежность метода, его робастность по отношению к шумам и ошибкам начального приближения обеспечивается в значительной мере за счет применения процедур *автоматической постобработки* ЦМР на каждом уровне пирамиды. Стереотождествление представляет собой набор сложных, иерархически организованных численных процедур, содержащих комплексный критерий качества для оценки достоверности результата отождествления в каждом узле регулярной координатной сетки. Автоматический анализ и постобработка созданной в таком виде матрицы ЦМР позволяют повысить скорость построения ЦМР, а также улучшить ее качество.

Для автоматической коррекции ЦМР разработаны алгоритмические процедуры распознавания аномальных значений высот и замены их значениями более высокой степени правдоподобия. Для устранения нормальных выбросов разработаны процедуры фильтрации и сглаживания. Процедуры восполнения недостающих значений сетки необходимы для завершения цельной модели.

Фильтрация выбросов производится как на основе ранговых статистик, так и с применением непрерывных критериев к выборкам высот, формируемым скользящим окном. Все алгоритмы являются адаптивными с порогом, настраиваемым на локальные свойства рельефа.

Процедуры сглаживания включают метод сглаживания ЦМР, основанный на использовании адаптивной техники скользящего окна и бикубических полиномов и метод Гримпсона, минимизирующий метрику поверхности, выраженную через ее вторые частные производные

$$E(z) = \sum_{i=1}^{M-2} \sum_{j=0}^{M-1} (z_{i-1,j} - 2z_{ij} + z_{i+1,j})^2 + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=1}^{M-2} (z_{i,j-1} - 2z_{ij} + z_{i,j+1})^2 + 2 \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=1}^{M-2} (z_{ij} - z_{i+1j} - z_{i,j+1} + z_{i+1,j+1})^2 + \beta \sum_i (z(x_i, y_i) - H(x_i, y_i))^2$$

Для восполнения значений высот в незаполненных точках и областях матрицы используются процедуры нелинейной аппроксимации: билинейная интерполяция, интерполяция по обратному расстоянию, триангуляция Делоне. Выбор конкретной формы аппроксимации осуществляется автоматически и зависит от формы и размеров заполняемой области. Для этого производится предварительный анализ топологии и размеров незаполненных областей сетки с применением морфологических операций.

Для улучшения точности и проработки деталей рельефа построенной ЦМР разработан метод коррекции ЦМР с применением ортофото, являющийся модификацией метода итеративного ортофото.

На ряде реальных данных показана высокая эффективность предложенных алгоритмов и высокое качество получаемых результатов.

В шестой главе излагаются вопросы разработки методики автоматизированного создания цифровых моделей зданий, сочетающих в себе

высокую метрическую точность геометрической модели и фотографическое качество текстур, по результатам наземной съемки.

Общий теоретический анализ проблемы позволяет сделать заключение о фундаментальном отличии технологий обработки данных аэрокосмической и наземной фотосъемки, которое определяется не только способом получения снимков, но и различием топологии объектов съемки. Если в первом случае объект топологически эквивалентен плоскости, то во втором он топологически эквивалентен сфере (рис.3). Вследствие этого, а также ряда других особенностей использовать процесс обработки данных, принятый для аэрокосмической съемки весьма затруднительно, а, скорее всего, невозможно.

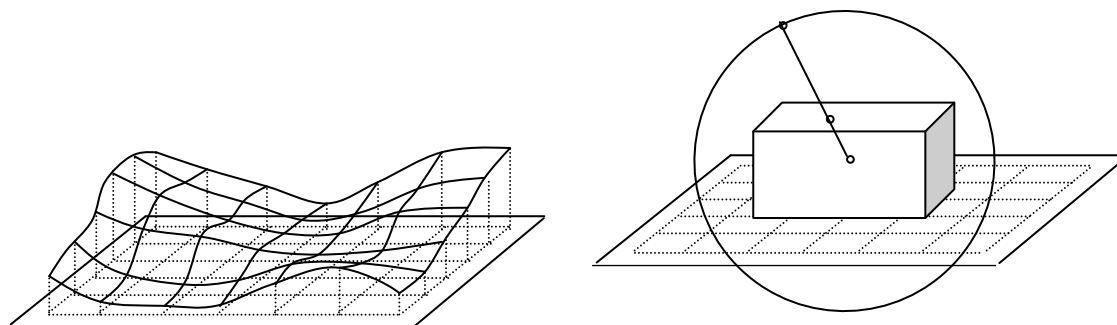


Рис. 3 – Различие топологий в аэрокосмической и наземной фотосъемке

Представленная методика включает в себя создание цифровой модели поверхности (ЦМП) и формирование текстурного покрытия объекта. Конечной формой представления ЦМП является TIN (Triangulated Irregular Network), - именно эта форма необходима для создания текстурного покрытия и для экспорта полученных моделей в универсальные распространенные форматы типа 3ds.

Для варианта, когда исходные данные представлены только снимками и при самых общих ограничениях на форму зданий разработан метод *автоматизированного* создания ЦМП и *автоматического* формирования текстурного покрытия. На первом этапе построения ЦМП выполняется съемка ограничивающих контуров стен, оконных и дверных проемов по стереомоделям. Полученная геометрическая модель служит основой для

построения TIN. Проблема заключается в том, что для поверхности, топологически эквивалентной сфере, не известен универсальный и эффективный алгоритм аналогичный алгоритму Делоне. Задача еще более усложняется, если речь идет о триангуляции невыпуклого множества, какими и являются многие искусственные объекты.

Предлагается решение проблемы на основе некоторого дополнительного описания структуры поверхности, включающего топологические отношения между векторными графическими элементами – полигонами, представляющими наиболее существенные детали здания. Идея заключается в том, чтобы поставить в соответствие каждому элементу символическое имя и создать описание пространственных связей элементов, то есть, способа их соединения друг с другом. Затем такое описание используется алгоритмом формирования TIN.

Рассмотрим разбиение поверхности объекта O на элементы S_i , границами которых являются контуры P_i . По определению, *разбиением* множества O называется система множеств таких, что:

$$1) S_k \cap S_m = \emptyset, k \neq m,$$

$$2) O = \bigcup_i S_i, \text{ где } i = 1, 2, \dots, N; N - \text{число элементов покрытия.}$$

Будем рассматривать только такие представления объекта, в которых ограничивающими контурами составляющих его поверхностей являются полигоны, не обязательно плоские. Для описания структуры *объекта* вводятся 2 типа отношений между его *элементами*: *примыкание* и *принадлежность*.

Определение 1. Контур P_i и P_k , ограничивающие поверхности S_i и S_k смыкаются (*примыкают*), если $S_i \subset O$, $S_k \subset O$ и $S_i \cap S_k = \emptyset$.

Определение 2. Контур P_m принадлежит контуру P_k , если $S_m \subset S_k$.

На основе введенных таким образом отношений строится *формальная модель* здания, т.е. описание структуры его поверхности с указанием составляющих элементов и способа связи между ними. Модель представляет собой *граф разбиения*, уровни которого включают контуры стен, контуры

дверных и оконных проемов внешней стены, контуры внутренних поверхностей дверных и оконных проемов и т.д. Таким образом, создается формальное описание объекта, которое прочитывается и интерпретируется алгоритмом построения TIN ЦМП объекта. Предложенный подход сводит исходную задачу триангуляции поверхности сложной топологии к задаче триангуляции элементарных поверхностей и дает правило их последующего слияния. Поскольку построение графа разбиения в программном интерфейсе выполняется легко и быстро и позволяет ускорить процесс создания модели в несколько раз, можно говорить об эффективной *автоматизации* процесса.

Завершающим этапом в создании видеореалистичной модели объекта, является получение текстур модели метрического качества на основе исходных снимков. При выполнении этой задачи учитываются как геометрические, так и фотометрические искажения снимков и обеспечивается их эффективная коррекция в процессе формирования текстурных фрагментов. Процесс автоматизирован полностью и включает в себя следующие этапы:

1. *Определение видимости полигонов модели для различных точек съемки.*
2. *Получение текстур из набора снимков с выбором наилучшего снимка.*

Оптимизация производится по углу отклонения нормали от оси съемки, минимизируются геометрические искажения фрагментов.

3. *Автоматическая постобработка текстур.* Этот этап обработки наиболее важен, поскольку именно он определяет фотографическое качество текстур. Постобработка включает в себя геометрическую трансформацию (исправление перспективных искажений) и фотометрическую коррекцию текстур, использующую специально разработанные алгоритмы выравнивания яркостей и повышения контраста, а также предложенные модификации медианных и сглаживающих фильтров.

Экспериментальные измерения показали, что методика обеспечивает точность созданных моделей и текстур порядка 1-2 см при съемке объекта бытовой калиброванной камерой разрешения 7,2 Мпикс с расстояний порядка 20м.

Далее (раздел 5) показано, как при использовании дополнительных опорных данных и введении ограничений на форму зданий может быть создан метод *полностью автоматического* создания ЦМП. В качестве дополнительной информации здесь используется план фундамента, а ограничения на форму выделяют довольно широкий класс так называемых «типовых зданий». В качестве необходимой математической поддержки автоматизации используются методы обработки изображений, математической статистики и теории графов.

Процесс создания геометрической модели объекта включает в себя следующие этапы:

1. *Локализация линейных элементов контуров здания на изображениях.*
Алгоритм основан на классическом преобразовании Хафа. Значительное увеличение его эффективности в данном случае достигается за счет предварительного ограничения на изображении области интереса, вычисляемой по плану фундамента и элементам ориентирования снимка. Это позволяет отсекать ложные максимумы, усиливать главные и значительно сокращает время поиска. Последующая гистерезисная обработка приводит к формированию непрерывных отрезков вдоль заданных направлений и, наконец, фильтрация собранных отрезков по размерам и положению завершает выделение контуров здания на изображениях.
2. *Определение пространственных координат линейных элементов контуров.*
Производится по одиночным снимкам; используются плоскости плана, пиксельные координаты концов отрезков и элементы ориентирования снимка.
3. *Пространственная сборка и уточнение модели.* Предложенный метод сборки основан на избыточности числа снимков и заданном графе связности стен и ребер здания. Эта информация позволяет произвести уточнение положения ребер пространственной модели и разрешение коллизий за счет применения статистического анализа и анализа графов. В завершение

используется стереофотограмметрический метод для уточнения положения углов здания.

4. *Поиск элементов фасада по цифровому эталону.* Решается задача детализации геометрической модели здания путём выделения на фасаде повторяющихся элементов (окон, дверей). В качестве эффективного инструмента решения данной задачи разработан и применен метод детектирования по комплексному эталонному описанию. Предложен вариант ускорения алгоритма поиска, а также его масштабно инвариантная модификация.



Рис. 4 - Модель здания, автоматическое создание ЦМП и текстур

Завершающим этапом в создании видеореалистичной модели объекта, является получение текстур модели метрического качества на основе исходных снимков (рис.4). Процесс автоматизирован полностью и описан выше.

В седьмой главе представлена разработка методов автоматического построения дискретной цифровой модели поверхности (ЦМП) по стереопарам снимков, полученных способом наземной съемки. Проведен анализ особенностей этого вида съемки по сравнению с аэрокосмической и проблем, которые они могут вызвать при стереоотождествлении. К наиболее существенным особенностям относятся:

1. Отношение базиса съемки к расстоянию до объекта практически любое.
2. Отклонение схемы съемки от нормального случая съемки.
3. Глубина сцены практически любая.
4. Содержание сцены, текстуры снимков - разнообразие возможных сюжетов и сцен таково, что текстуры и контуры изображений могут быть практически любыми от предельно четких до почти полного их отсутствия.

Приведенные особенности означают наличие больших параллаксов, значительных геометрических искажений и специфических текстурных характеристик сравниваемых фрагментов стереопары. Кроме того, как показано в главе 6, существует фундаментальное различие технологий обработки данных наземной и аэрокосмической съемки, связанное различием топологии объектов съемки. Одним из следствий этого является невозможность построения ЦМП в виде регулярной сети и необходимость использования TIN.

С учетом перечисленного можно сформулировать следующие основные особенности стратегии стереоотождествления разработанного метода:

1. Формирование сетки ЦМП с помощью операторов интереса, использование разных операторов.
2. Применение окна переменной геометрии при вычислении площадных мер сходства точек.
3. Применение пирамиды изображений и пирамиды сеток ЦМП. Последовательное уточнение ЦМП и сгущение сетки TIN на каждом уровне.
4. Автоматическое выявление и коррекция ошибок стереоотождествления.
5. Использование различных стратегий сгущения сетки: в зависимости от информативности изображения или по заданному правилу.
6. Переход от локального стереоотождествления к глобальному.
7. Учет нелинейных деформаций изображения для получения субпиксельной точности измерений.

Использование нескольких операторов интереса очень существенно для создания детальной ЦМП объекта, поскольку разные критерии интереса

отмечают разные особенности текстур изображения, а в итоге – разные особенности формы объекта.

По применяемым для стереотождествления примитивам метод является площадным, корреляционным и основан на поиске максимума нормированной КФ. Окна прямоугольной формы отсекают углы фрагментов, где геометрические искажения максимальны. Это позволило повысить число правильно отождествленных точек на 30-50%.

Применение пирамид необходимо по нескольким причинам, важнейшие из которых многократное сокращение времени счета и повышение устойчивости алгоритма к ошибкам начального приближения. Их вероятность для объектов наземной съемки высока из-за большой глубины сцены и соответственно больших параллаксов. Ошибки стереотождествления обрабатываются на каждом уровне с помощью набора специальных фильтров, которые представляют собой простейший способ учета пространственных отношений внутри группы соседних точек TIN. Предложены варианты фильтров со скользящим окном *топологически* постоянного размера и фильтры с адаптивно настраиваемыми параметрами включая глубину отсечки и размер ячейки. Эффективность применения нескольких типов фильтров достаточно высока, остаточная доля выбросов составляет менее 0,01% исходной выборки.

Вопрос сгущения сети в случае TIN является нетривиальным. Существенным отличительным свойством разработанного метода является стратегия неравномерного сгущения, которая позволяет построить оптимальное дискретное представление моделируемой поверхности (рис.5). При этом неравномерность расположения точек соответствует локальной информативности изображения, и максимальная их плотность наблюдается в зонах наибольшей информативности. Таким образом, предложенный иерархический метод стереотождествления обладает свойством *адаптации TIN по отношению к форме моделируемой поверхности*.

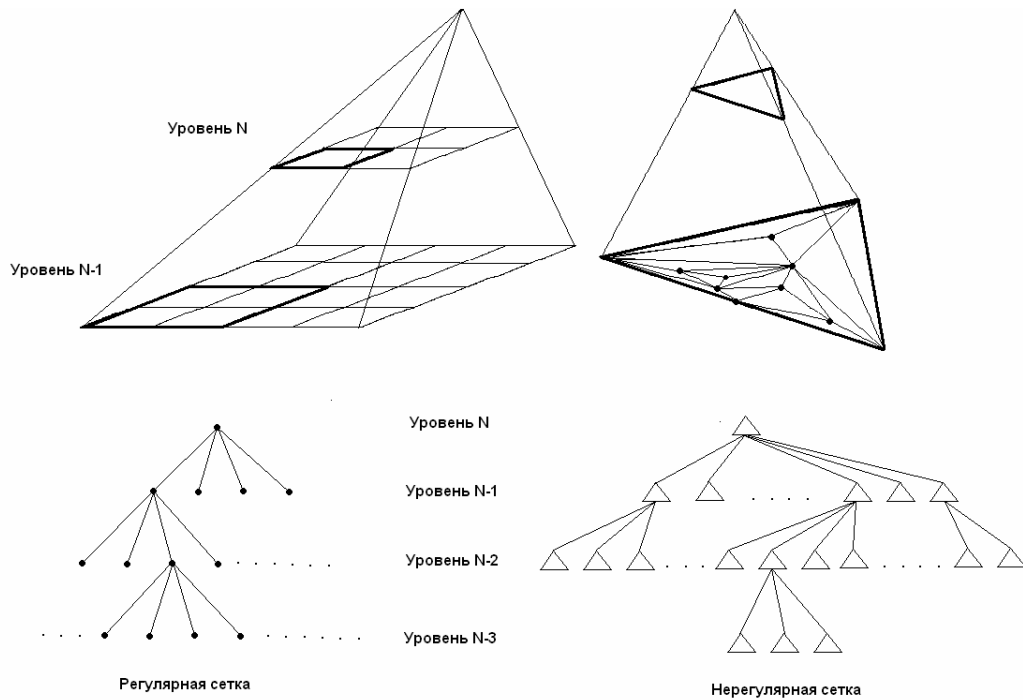


Рис. 5 – Стратегии сгущения регулярной и нерегулярной сеток ЦМП

Завершающим шагом к полноте использования информации изображений и получении детальной ЦМП объекта высокой надежности является реализация алгоритма *глобального стереотождествления* на основе вероятностной релаксации. При этом каждой точке a_i приписывается начальную вероятность отождествляется с меткой b_j $P_i^{(0)}(b_j)$, вычисляемая по коэффициенту корреляции и удовлетворяющая условию

$$\sum_j P_i^{(0)}(b_j) = 1$$

для $a_i \in A$. Тогда итеративное уточнение вероятностей отождествления меток и объектов производится по формуле

$$P_i^{(k+1)}(b_j) = \frac{P_i^{(k)}(b_j)[1 + q_i^{(k)}(b_j)]}{\sum_j P_i^{(k)}(b_j)[1 + q_i^{(k)}(b_j)]},$$

где $q_i^{(k)}(b_j)$ - фактор поддержки соседей объекта на k -й итерации,

$P_i^{(0)}(b_j) = \frac{W_i(b_j)}{\sum_j W_i(b_j)}$ - начальная вероятность отождествления метки. Тогда для

объекта a_i и метки b_j фактор поддержки определяется как

$$q_i^{(n)}(b_j) = \frac{E[U^{(n)}(b_j)D(a_i)] - E[U^{(n)}(b_j)] \cdot E[D(a_i)]}{\sigma[U^{(n)}(b_j)] \cdot \sigma[D(a_i)]}, \text{ где}$$

$$E[U^{(n)}(b_j)] = \frac{\sum_i V(b_j, c_i)}{m-1}, \quad E[D(a_i)] = \frac{\sum_{i'} D(a_i, a_{i'})}{m-1}, \quad E[U^{(n)}(b_j)D(a_i)] = \frac{\sum_{i'} V(b_j, c_{i'})D(a_i, a_{i'})}{m-1},$$

$$\sigma[U^{(n)}(b_j)] = \sqrt{\frac{\sum_i (V(b_j, c_i) - E[U^{(n)}(b_j)])^2}{m-1}}, \quad \sigma[D(a_i)] = \sqrt{\frac{\sum_{i'} (D(a_i, a_{i'}) - E[D(a_i)])^2}{m-1}}.$$

Итеративный процесс выполняется пока наибольшая вероятность отождествления для каждого объекта не станет больше, чем $1 - \varepsilon$ (где $\varepsilon \ll 1$).

Существенно, что:

- среди точек сгущения, полученных за счет релаксации, нет выбросов;
- все точки сгущения имеют низкий коэффициент корреляции и без привлечения контекстной поддержки со стороны окружения не могут быть надежно идентифицированы.

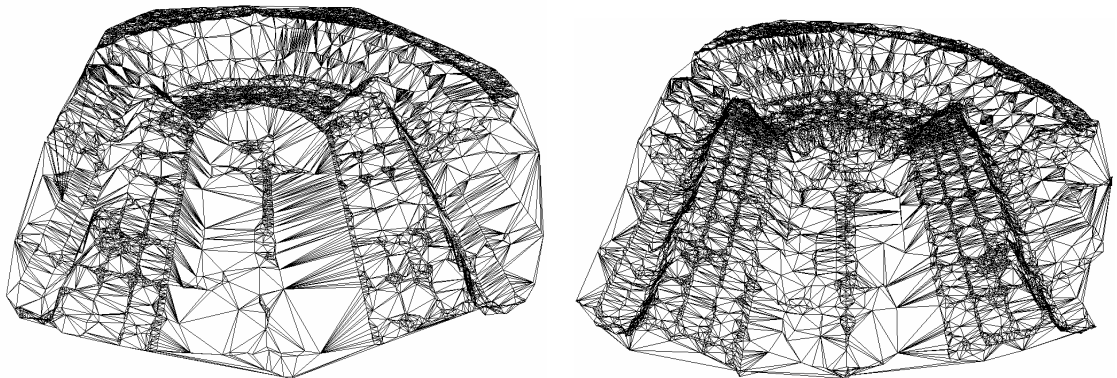


Рис. 6 - Сетка ЦМП до и после релаксации

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

Основные результаты работы

1. Проведен анализ существующих методов и алгоритмов цифровой фотограмметрии, базирующихся на интеллектуальном анализе и обработке изображений, исследованы важнейшие свойства этих методов с точки зрения разработки новых и модификации существующих алгоритмов, повышающих их эффективность.

2. Разработан метод автоматических измерений координат крестов сетки, впечатанной в снимок. Метод обладает следующими отличительными особенностями:
 - специальная предобработка изображения определяет устойчивость алгоритма поиска по отношению к световым бликам;
 - проверка результатов поиска в соответствии с критерием, учитывающим форму отклика, обеспечивает отбраковку ложных максимумов;
 - измерение положения крестов с субпиксельной точностью на основе алгоритма, учитывающего все пиксели, образующие крест.
3. Разработана методика автоматической генерации связующих точек для стереопар снимков, отличающихся по условиям съемки и содержанию изображенных сцен. Методика включает в себя методы выделения и признакового описания характерных особенностей изображения, а также алгоритмы их последующего анализа и отбраковки на основе применения пространственных метрических, топологических и стохастических соотношений.
4. Предложен автоматический метод внешнего ориентирования снимков, основанный на применении в качестве опорной информации трехмерных цифровых моделей деталей объекта съемки.
5. На основе классического корреляционного подхода разработан иерархический метод стереотождествления, использующий наряду с пирамидами изображений пирамиды регулярных сеток ЦМР и позволяющий сочетать устойчивость алгоритмов по отношению к ошибкам начального приближения с высокой скоростью генерации точек модели. Эти преимущества достигаются за счет последовательного уточнения начального приближения, а также выявления и коррекции ошибок стереотождествления на каждом уровне пирамиды. Метод полностью автоматизирован и предназначен для обработки космических и аэрофотоснимков.

6. Разработан иерархический метод стереотождествления, использующий пирамиды нерегулярных сеток ЦМП и обладающий свойством адаптации по отношению к форме моделируемой поверхности. Отличительными чертами метода являются максимальное использование информативных зон снимков за счет применения комбинации разных операторов интереса и окон непрямоугольной формы, автоматическая фильтрация ошибок стереотождествления на каждом уровне пирамиды и включение в ЦМП точек с низким уровнем корреляции благодаря пространственной поддержке ближайших вершин на основе вероятностной релаксации. Метод предназначен для обработки данных наземной съемки.
7. Разработана методика автоматизированного создания цифровых моделей типовых зданий, сочетающих в себе высокую метрическую точность геометрической модели и фотографическое качество текстур на основе материалов наземной фотосъемки и опорных данных. Методика включает в себя метод автоматизированного построения ЦМП на основе его формального описания, а также алгоритмы автоматического создания текстурного покрытия объекта с выбором наилучших текстур из набора снимков и последующей геометрической и фотометрической коррекцией текстур.
8. Разработана методика автоматического создания цифровых моделей типовых зданий с использованием дополнительных данных и ограничений на форму сооружения. Составной частью методики является метод поиска элементов фасада на основе комплексного цифрового эталона. Предложена масштабно-инвариантная модификация метода. В отличие от известной построенная методика основана на работе с одиночными снимками, что приводит к упрощению отдельных процессов и более легкой их автоматизации.
9. Созданы программные комплексы для фотограмметрической обработки стереопар снимков различных типов съемки: космической, авиационной и наземной.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Блохинов Ю.Б., Желтов С.Ю., Сибиряков А.В., Скрыбин С.В. Цифровая фотограмметрическая система Z_Space. Особенности и основные алгоритмы. Труды международной научно-технической конференции, посвященной 220-летию со дня основания МИИГАиК, Москва, 1999, с.90-92.
2. Блохинов Ю.Б., Бибичев А.Е. Полуавтоматическое дешифрирование зданий серийного типа по крупномасштабным аэрофотоснимкам. Труды международной научно-технической конференции, посвященной 220-летию со дня основания МИИГАиК, Москва, 1999, с.93-94.
3. Блохинов Ю.Б., Корнишев О.В. Автоматическая коррекция аномальных ошибок цифровой модели рельефа. Труды международной научно-технической конференции, посвященной 220-летию со дня основания МИИГАиК, Москва, 1999, с.92-93.
4. Фомченко М.М., Чекалин В.Ф., Блохинов Ю.Б., Васькин В.М., Кудряшов В.Я., Головин Ю.В., Некрасов В.В. Обработка космических снимков с помощью фотограмметрической системы «ORTHO/Z_SPACE». ГИС обозрение, 2, 1999 с.57-63.
5. Тюфлин Ю.С., Блохинов Ю.Б., Скрыбин С.В. Развитие методов фотограмметрии и дистанционного зондирования. Вестник компьютерных и информационных технологий, М., №5, 2004, с.12-19
6. Блохинов Ю.Б., Скрыбин С.В., Грибов Д.А. Цифровая фотограмметрическая система Z_Space 2.0. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005613161, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2005
7. Блохинов Ю.Б., Скрыбин С.В., Грибов Д.А. Цифровая фотограмметрическая система Z_Space 3.0. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005613160, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2005

8. Блохинов Ю.Б., Скрябин С.В., Грибов Д.А., Михайлов А.П., Чибуничев А.Г., Курков В.М., Веркеенко М.С. Цифровая фотограмметрическая система Z_Proxima 1.0. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2008613431, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2008

9. Блохинов Ю.Б., Грибов Д.А., Чернявский А.С. Задача привязки изображений для некоторых случаев ракурсной фотосъемки. Известия РАН. Теория и системы управления, М., №6, 2008, с.129-143

10. Блохинов Ю.Б., Грибов Д.А., Приматов Б.Н., Скрябин С.В., Шашов Ю.Ю. Автоматическая калибровка цифровых камер на основе использования кольцевых кодированных меток. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, М., №2, 2009, с.104-109

11. Блохинов Ю.Б. Алгоритмы автоматической постобработки ЦМР. Труды международной научно-технической конференции, посвященной 230-летию со дня основания МИИГАиК, Москва, 2009, с.147-148.

12. Михайлов А.П., Чибуничев А.Г., Курков В.М., Блохинов Ю.Б., Скрябин С.В., Грибов Д.А. Технология оперативной цифровой наземной фотограмметрической съемки. Труды международной научно-технической конференции, посвященной 230-летию со дня основания МИИГАиК, Москва, 2009, с.151-152.

13. 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. Техническое зрение в системах управления мобильными объектами. Серия механика, управление и информатика, Труды научно-технической конференции-семинара под ред. Р. Р. Назирова, Таруса, 16-18 марта 2010, с.92-109

14. Блохинов Ю.Б., Веркеенко М.С. Алгоритмы формирования видеореалистичных текстур по данным наземной фотосъемки. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, М., №5, 2010, с.44-49

15. Блохинов Ю.Б. Автоматизация взаимного ориентирования цифровых снимков на основе алгоритмов машинного зрения. Известия РАН. Теория и системы управления, М., №6, 2010, с.152-163

16. Блохинов Ю.Б. Алгоритмы формирования цифровой модели поверхности и текстурного покрытия в наземной фотограмметрии. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, М., №1, 2011, с.51-57

17. Блохинов Ю.Б. Методы автоматической постобработки ЦМР. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, М., №2, 2011, с.20-26

18. Блохинов Ю.Б. Метод автоматического определения элементов ориентирования орбитальной станции по эталонным модельным изображениям ее узлов. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, М., №2, 2011, с.13-19

19. Блохинов Ю.Б., Веркеенко М.С. Алгоритмы построения цифровых трехмерных моделей уникальных объектов. Известия РАН. Теория и системы управления, М., №4, 2011, с.118-131

20. Блохинов Ю.Б., Горбачев В.А. Привязка наземных объектов на аэрофотоснимках на основе анализа контуров. Известия РАН. Теория и системы управления, М., №5, 2011, с.66-77

21. Блохинов Ю.Б., Чернявский А.С. Алгоритмы и результаты моделирования процессов обнаружения и распознавания трехмерных сцен. «Моделирование авиационных систем», Труды юбилейной всероссийской научно-технической конференции, Москва, 12-14 апреля 2011, с.128-134.

22. Блохинов Ю.Б., Веркеенко М.С., Скрябин С.В. Комплексные эталонные описаний наземных сцен и особенности их подготовки на основе доступной информации. «Моделирование авиационных систем», Труды юбилейной всероссийской научно-технической конференции, Москва, 12-14 апреля 2011, с.135-142.

23. Блохинов Ю.Б., Чернявский А.С. Метод комплексирования данных разноракурсной съемки для обнаружения сложных объектов в условиях сильной зашумленности. Искусственный интеллект, АН Украины, №3, 2011, с.220-228.

24. Zheltov S.Y., Blochinov Y.B., Stepanov A.A., Sibiryakov A.V. Computer 3D Site Model Generation Based On Aerial Images. – SPIE Proceedings, 1997, vol.3084, pp.336-345.

25. Blokhinov Y.B., A.V. Sibiryakov S.V. Skryabin Z_Space - digital photogrammetric system for Russian TK-350 images. Z_Space - digital photogrammetric system for Russian TK-350 images. XIX Congress of the ISPRS, Vol. XXXIII , Part B2, Com.II, 81-90, Amsterdam, 2000

26. Blokhinov Y.B., Gribov D.A. A new approach to automatic junction of overlapping aerial imagery data. XX Congress of the ISPRS, Vol. XXXV , Part B3, Com.III, 179-183, Istanbul, 2004

27. Blokhinov Y.B., Gribov D.A., Zheltov S.Y. An automatic contour based detection of terrestrial objects from aerial imagery data. XXI Congress of the ISPRS, Vol. XXXVII , Part B3, Com.IV, 413-419, Beijing, 2008