

*На правах рукописи*

**ГОМОЗОВ Олег Анатольевич**



**МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
КОСМИЧЕСКОЙ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ  
ОТ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОГО  
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Рязань 2005**

Работа выполнена в Рязанской государственной радиотехнической академии

Научный руководитель: доктор технических наук  
**Кузнецов Алексей Евгеньевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Пылькин Александр Николаевич**

кандидат технических наук  
**Гриць Валерий Матвеевич**

Ведущая организация: **Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева, г. Москва**

Защита состоится **15 июня 2005 г. в 12 часов** на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в Рязанской государственной радиотехнической академии по адресу:

**390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д.59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанской государственной радиотехнической академии.

Автореферат разослан 11 мая 2005г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.211.01  
к.т.н., доцент



**Пржегорлинский В.Н.**

2006-4

9497

2140392

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

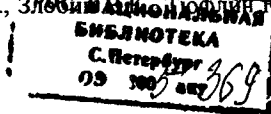
**Актуальность работы.** До недавнего времени съемка земной поверхности с высоким пространственным разрешением (1 м и менее) выполнялась с помощью фотографических спутников, а получаемая информация использовалась, главным образом, для решения задач специального визуального наблюдения. Поэтому основным назначением как самих съемочных систем, так и технологической обработки было получение изображения, обладающего высокими фотометрическими характеристиками. Фотограмметрические задачи, связанные с устранением геометрических искажений изображений, как правило, решались с использованием обобщенных моделей съемочной системы (кадровой, щелевой или панорамной) и большого количества опорных данных о местности, представленных в виде опорных точек и цифровых моделей рельефа.

В настоящее время получают интенсивное развитие оптико-электронные космические системы мониторинга земной поверхности, основанные на новых принципах регистрации и передачи информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). NASA (США) и Европейское космическое агентство прилагают беспрецедентные усилия по созданию группировки искусственных спутников Земли, которая обеспечивала бы получение оперативной и высокоточной информации о земной поверхности. К их числу, в первую очередь, можно отнести ИСЗ с системами высокого пространственного разрешения – Ikonos, ObrView, QuickBird, Spot-5.

Появление российских космических аппаратов (КА) с оптико-электронными системами высокого пространственного разрешения («Арсон», «Ресурс-ДК», «Монитор-Э»), оснащенных высокоточными системами навигации, выдвигает новые требования к методам обработки материалов ДЗЗ. В отличие от технологий обработки космической информации среднего и низкого разрешения (30 – 1000 м), получаемой от КА «Ресурс-01», «Метеор-3М», «Океан-О», NOAA и предназначенной для обновления карт масштабов 1:200000 – 1:1000000, необходимо учитывать специфические особенности формирования видеоданных и более точно определять пространственные координаты элементов изображения с целью картографирования территорий в масштабе не менее 1:10000.

В работе дается решение важной научно-технической проблемы, связанной с разработкой прецизионных методов и полнофункциональных технологий геометрической обработки изображений от существующих и вновь проектируемых систем ДЗЗ высокого пространственного разрешения. Работа направлена на повышение эффективности использования систем ДЗЗ и удовлетворение постоянно растущих требований потребителей по оперативности и точности результатов обработки.

**Степень разработанности темы.** Вопросам геометрических преобразований данных дистанционного зондирования Земли посвящены труды таких выдающихся отечественных и зарубежных ученых как Лобанов А.Н., Урмаев М.С., Агапов С.В., Журкин И.Г., Злобин А.И., Юрбин Ю.С., Киенко Ю.П.,



Погорелов В.В., Huang T., Jordan L., Kronberg P., Pratt W., Rosenfeld A. Наряду с ними большой опосредованный вклад в теорию геометрических преобразований космических изображений сделали разработчики теории орбитального движения КА – Тихонравов М.К., Яцунский И.М., теории фигуры и гравитационного поля Земли – Молоденский С.М., Грушинский Н.П., методов математической картографии – Бугаевский Л.М., J.P.Snyder. В основе современных методов обработки космических изображений лежат закономерности, полученные этими учеными.

Однако область знаний, связанная с обработкой космических снимков, непрерывно развивается. Это обусловлено тем, что, с одной стороны, системы ДЗЗ постоянно совершенствуются, и часто для их построения используются принципиально новые физические основы и конструктивные решения, а, с другой стороны, требования потребителей к точности обработки неуклонно повышаются. То есть возникает необходимость в разработке высокоточных методов и технологий геометрической коррекции изображений, учитывающих особенности построения новых систем ДЗЗ. Достаточно сказать о том, что использование стандартных пакетов обработки аэрокосмических изображений, таких как «Фотоплан», Erdas, ErdMapper и др., возможно только при решении узкого круга задач, поскольку в них используются обобщенные модели съемки, не учитывающие многоматричную структуру построения сканирующих устройств. Кроме того, одной из особенностей известных технологий геометрической обработки сканерной информации является недостаточная точность определения координат объектов изображения (5-10 пикселей при размерах пикселя на местности 30-40 м), что ограничивает применение используемых в них моделей для систем высокого пространственного разрешения. Поэтому важной задачей является проектирование высокоточных моделей геометрической коррекции, наиболее полно учитывающих весь спектр искажающих факторов, реализующих структурное восстановление изображений и обеспечивающих точность геопривязки видеоданных не менее одного метра.

Практически отсутствуют публикации по вопросам разработки методик априорной и апостериорной оценки геометрической точности видеoinформации, а также методам калибровки сканирующих устройств по результатам съемки тестовых полигонов.

Недостаточно исследованными являются задачи, связанные с трансформированием сканерных изображений по цифровым моделям рельефа и высокоточным геодезическим ориентированием маршрутов съемки при ограниченном числе опорных данных. В этом отношении оперативное решение вопросов координатного обеспечения наблюдаемых объектов и картографирование больших площадей, имеющих слабое топогеодезическое обеспечение, являются исключительно актуальными задачами.

*Целью диссертации* является разработка методов и технологий геометрических преобразований космических изображений, получаемых отечественными оптико-электронными системами ДЗЗ высокого разрешения, и создание на их основе для ~~приемных центров~~ полнофункционального программного

обеспечения, способного решать задачи мелкомасштабного и крупномасштабного картографирования земной поверхности.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие *основные задачи*:

- обоснование направлений создания прецизионных технологий обработки спутниковых изображений высокого пространственного разрешения;
- проектирование высокоточных моделей, описывающих процессы формирования и геопривязки изображений от многоматричных сканерных систем;
- разработка методов трансформирования и ортотрансформирования одиночных и перекрывающихся снимков, а также оценки точности результатов обработки;
- реализация полнофункциональных технологий в программном обеспечении геометрической обработки видеоинформации от существующих и вновь проектируемых систем ДЗЗ высокого пространственного разрешения.

*Научная новизна* работы заключается в том, что в ней впервые дается систематизированное решение крупной научной задачи, связанной с созданием математических и методологических средств высокоточной обработки видеоинформации от спутниковых систем нового принципа построения. Это определяется тремя главными обстоятельствами. Во-первых, применением всей совокупности данных, получаемых об угловом и линейном движении КА, систем навигации и астроориентации, наземных и летных калибровочных испытательных съемочной аппаратуры для построения высокоточных моделей координатной привязки изображений. Во-вторых, комплексным использованием орбитальных параметров, опорной информации и цифровых матриц рельефа при геометрических преобразованиях как одиночных изображений, так и совместной обработке блока перекрывающихся снимков. В-третьих, использованием данных о точностных характеристиках систем КА для получения достоверных априорных и апостериорных геометрических параметров изображений.

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

1. Геометрические модели формирования и геопривязки сканерных изображений высокого пространственного разрешения, включающие:

- высокоточную модель съемки и геопривязки изображений земной поверхности;
- модель структурного восстановления изображений по орбитальным данным;
- метод дифференциального уточнения параметров орбитального и углового движения съемочной системы по минимальному объему опорной информации;
- методику уточнения параметров внутреннего ориентирования съемочной системы по тестовым полигонам.

2. Методы и алгоритмы геометрической обработки спутниковой информации, а именно:

- методику априорной оценки точности трансформирования снимков по орбитальным данным;

- метод ортотрансформирования с использованием локальной модели рельефа;

- алгоритм обработки блока космических изображений.

3. Структурные и алгоритмические решения по проектированию систем и технологий высокоточных геометрических преобразований космических изображений, в том числе:

- алгоритм фильтрации грубых ошибок измерений с использованием порядковых статистик;

- структурные и информационные модели построения систем обработки;

- результаты экспериментальных исследований и оценки эффективности создаваемых технологий.

*Практическая ценность.* Работа имеет важное практическое значение, поскольку на основе разработанных методов, моделей, алгоритмов и технологий спроектировано семейство программных систем обработки космических изображений, получаемых с КА «Аркон» («OrthoScan»), «Монитор-Э» («NormScan»), «Ресурс-ДК» («OrthoNormScan»). Эти системы эксплуатируются в Федеральном центре Роскосмоса в г. Москве, Координационно-аналитическом центре ГКНПЦ им. М.В.Хруничева и войсковой части 54023.

По результатам использования программных систем при выполнении работ по высокоточной обработке материалов ДЗЗ получены следующие оценки эффективности их применения: до 70 % сокращаются затраты на выполнение дорогих полевых работ, связанных с получением опорных данных о местности, и до 90 % сокращается трудоемкость выполнения операций привязки изображений к картографической основе.

*Достоверность* полученных результатов подтверждена сопоставлением альтернативных подходов по обработке материалов ДЗЗ с использованием системы «OrthoScan», с одной стороны, и программных комплексов «Фотоплан» и «Erdas», с другой, а также положительными результатами приемо-сдаточных испытаний и опытной эксплуатации созданных систем при обработке данных КА «Аркон».

*Реализация и внедрение.* Диссертационная работа включает в себя исследования, выполненные в рамках государственного контракта с Российским федеральным космическим агентством № 756-5505.99, ОКР № 25/ЦКТ, ОКР № 134/03, ОКР № 4-00 и ОКР № 20-03.

Результаты диссертационной работы в виде математического и программного обеспечения внедрены в Научном центре оперативного мониторинга Земли, ГКНПЦ им. М.В.Хруничева, войсковой части 54023, что подтверждается соответствующими актами, приведенными в приложении.

*Апробация работы.* Результаты исследований, составляющие основное содержание диссертации, докладывались на 4-х международных и 3-х всероссийских конференциях и семинарах:

3-й и 4-ой междунар. н.-тех. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (г. Рязань, 2000г., 2003г.), IX всероссийск. н.-тех. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании»

(г. Рязань, 2004 г.), II всероссийск. н.-тех. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2004 г.), междунар. молодежн. н.-тех. конф. «XXX Гагаринские чтения» (г. Москва, 2004 г.), 13-я междунар. н.-тех. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (г. Рязань, 2004 г.), вторая военно-науч. конф. космических войск (г. Санкт-Петербург, 2004 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ: 5 статей, 9 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях и семинарах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения, которое содержит документы о внедрении и практическом использовании результатов. Общий объем работы составляет 153 с., в том числе: основное содержание – 140 с., 34 рисунка, 15 таблиц, список литературы на 9 с. (79 наименований), приложение - 4 с.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

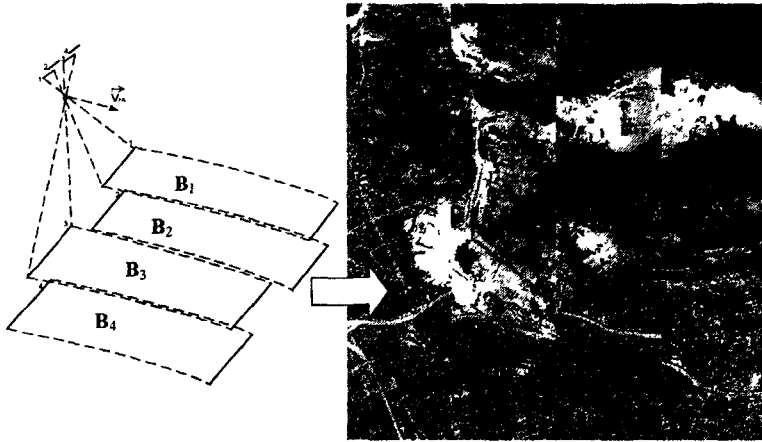
*В первой главе рассмотрены принципы формирования оптико-электронных изображений и задачи по их геометрической коррекции; отмечены узкие места известных разработок, используемых в системах ДЗЗ среднего и низкого пространственного разрешения; сформулированы предложения по созданию высокоточных методов и технологий геометрической обработки видеоданных высокого пространственного разрешения*

Процесс формирования сканерных изображений в системах ДЗЗ сопровождается сложными физическими явлениями и зависит от большого числа детерминированных и случайных искажающих факторов. В результате их действия существенно изменяются геометрические соотношения между элементами изображения и одноименными точками земной поверхности. Поэтому перед передачей потребителям материалы съемки должны подвергаться геометрической коррекции, направленной на установление взаимно однозначного координатного соответствия между объектами земной поверхности и их образами на снимке, с представлением результата в виде картографического измерительного документа. В общем виде такая обработка выполняется на основе математических соотношений  $x = F_x(m, n)$  и  $y = F_y(m, n)$ , устанавливающих взаимосвязь между пикселями преобразованного  $d(x, y)$  и исходного  $b(x, y)$  изображений,

$$d[F_x(m, n), F_y(m, n)] = b(m, n), m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Уравнения  $F_x$  и  $F_y$  определяют на основе математической модели, описывающей процесс формирования видеоданных сканирующим устройством в условиях орбитального полета спутника. В этой связи рассмотрены принципы функционирования систем ДЗЗ низкого и среднего пространственного разрешения.

Показано, что для достижения высокого пространственного разрешения в системах ДЗЗ типа «Монитор-Э», «Аркон», «Ресурс-ДК», IRS-1С и др. используется ряд новых конструктивных решений. Во-первых, для съемки используются многоматричные сканеры, которые состоят из десятков накопительных ПЗС-матриц, расположенных в фокальной плоскости с небольшим взаимным перекрытием в продольном направлении и со сдвигом друг относительно друга в поперечном направлении (см. рисунок) Во-вторых, формирование кадровой развертки может осуществляться как путем пассивного сканирования вдоль орбиты, так и за счет дополнительного сложного движения съемочной системы по заданному закону. Сформулирован перечень основных задач геометрических преобразований изображений от систем подобного типа.



а) формирование изображения

б) исходное изображение

Рисунок – Структура изображения, получаемого опико-электронной съемочной системой высокого разрешения

Проведен анализ известных моделей и технологий координатной обработки изображений, спроектированных для систем ДЗЗ низкого и среднего пространственного разрешения. Показано, что эти разработки не отвечают требованиям по точности геопривязки видеоданных, не учитывают многоматричную структуру построения сканирующих датчиков, не позволяют реализовать технологии получения ортопланов и мозаичных изображений. Сформулированы требования к математической модели опико-электронной съемочной системы. Сделан вывод о том, что высокую точность обработки опико-электронных снимков можно обеспечить за счет совместного применения аналитической модели и метода геодезического ориентирования по опорным точкам.

Анализ методов оценки качества изображений показал, что в публикации уделяется мало внимания априорной оценке качества изображений, хотя она



является актуальной как для потребителей информации ДЗЗ, так и для разработчиков КА ДЗЗ. Установлено, что для решения этой задачи следует разработать метод, который на основе априори известных точностных характеристик систем КА позволит определить ошибку геодезической привязки изображения к абсолютной системе координат и ошибку взаимного положения контуров на изображении.

Выполнен анализ методов обработки блока перекрывающихся изображений. Показано, что традиционное построение блочной триангуляции требует больших ресурсов и не позволяет уравнивать изображения, полученные различными съемочными системами. Для картографирования значительных территорий по изображениям, получаемым от различных оптико-электронных систем, необходимо разработать подход, который бы не накладывал ограничений на размер блока и был бы инвариантен к типу изображений, включенных в блок.

Сформулированы предложения по созданию высокоэффективных технологий геометрической обработки изображений от существующих и вновь проектируемых российских КА высокого разрешения.

*Во второй главе разрабатываются математические модели съемки земной поверхности и структурного восстановления непрерывного изображения из отдельных перекрывающихся фрагментов, а также методы повышения точности модели геопривязки видеоданных на основе уточнения параметров внешнего и внутреннего ориентирования съемочной системы*

Разработана модель съемки земной поверхности, которая лежит в основе всех методов и алгоритмов геометрической обработки изображений и позволяет реализовывать технологию геопривязки и трансформирования видеоданных по орбитальным параметрам. Модель в общем виде представлена уравнением (2) и включает: геометрическую модель съемочной системы; модель орбитального движения центра масс КА; модель движения съемочной системы вокруг центра масс; модель Земли (статическую и динамическую),

$$x = F_x(m, n, h, D, \mathbf{V}_m, \mathbf{\Omega}_m, \mathbf{P}), \quad y = F_y(m, n, h, D, \mathbf{V}_m, \mathbf{\Omega}_m, \mathbf{P}), \quad (2)$$

где  $h$  - высота точки на местности;  $\mathbf{D} = [f, x_0, y_0, d_1, \dots, d_5]$  - фотограмметрические параметры съемочной системы (фокусное расстояние, координаты главной точки, параметры суммарной дисторсии съемочной системы);  $\mathbf{V}_m = [X^0, Y^0, Z^0]$  - вектор пространственного положения КА;  $\mathbf{\Omega}_m = [\alpha, \omega, k]$  - вектор углового положения съемочной системы;  $\mathbf{P}_m = [p_1, p_2, \dots]$  - параметры, описывающие картографическую проекцию и земной эллипсоид.

Модель фотограмметрических параметров описывает искажения, вносимые неточным определением фокусного расстояния  $f$ , координат главной точки  $(m_0, n_0)$  и дисторсии объектива съемочной системы.

Модель орбитального движения представлена дифференциальными уравнениями второго порядка:

$$\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} + \mu \frac{X}{r^3} = \frac{\partial R}{\partial X} + Q_X, \quad \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} + \mu \frac{Y}{r^3} = \frac{\partial R}{\partial Y} + Q_Y, \quad \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} + \mu \frac{Z}{r^3} = \frac{\partial R}{\partial Z} + Q_Z, \quad (3)$$

где  $\mu$  - геоцентрическая гравитационная постоянная;  $R$  - пертурбационная функция;  $R = V - V_{сф}$ ;  $V$  - потенциал реальной Земли;  $V_{сф}$  - потенциал сферической Земли;  $Q_X, Q_Y, Q_Z$  - возмущающее сопротивление атмосферы.

Получение вектора углового положения съёмочной системы  $\Omega_m$  выполняется для каждой строки изображения путем решения следующей системы уравнений:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \frac{\partial \alpha}{\partial t}, \quad \omega(t) = \omega_0 + \frac{\partial \omega}{\partial t}, \quad \kappa(t) = \kappa_0 + \frac{\partial \kappa}{\partial t}, \quad (4)$$

где  $\alpha_0, \omega_0, \kappa_0$  - угловые элементы ориентирования съёмочной системы на начало съёмки;  $\partial \alpha / \partial t, \partial \omega / \partial t, \partial \kappa / \partial t$  - угловые скорости.

Для определения координат точек земной поверхности, наблюдаемых на снимке, совместно решаются уравнение прямой фотограмметрической засечки и модифицированное уравнение земного эллипсоида, представленное в геоцентрической системе координат,

$$X^2 + Y^2 + Z^2 + \varepsilon_2^2 Z^2 = (a_3 + h)^2, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_2^2, a_3$  - квадрат второго эксцентриситета и большая полуось земного эллипсоида соответственно.

В качестве модели параметров Земли и картографических проекций положена схема описания и кодирования систем координат POSC/EPSC, принятая также в спецификации формата GeoTIFF и доработанная с учетом специфики использования в российских системах координат системы «нормальных» высот, в отличие от «ортометрических», используемых в зарубежных системах.

Разработана модель структурного восстановления непрерывного изображения из отдельных фрагментов, формируемых многоматричным сканером (см. рисунок). Модель основана на аппроксимации уравнений геопривязки видеоданных от каждой ПЗС-матрицы (2) и описывает параметры взаимного перекрытия фрагментов в виде полиномов второй степени, задающих продольное  $a(t)$  и поперечное  $b(t)$  смещение соседних изображений, а также их взаимный разворот  $\varphi(t)$  для заданного момента времени  $t$ .

Модель апробирована на реальной информации, полученной от КА «Аркон». На ее базе реализован ряд важных технологических операций, связанных с оперативным синтезом непрерывного изображения на этапе каталогизации поступающих на приемный центр потоков видеоданных и формированием выходных информационных продуктов всех уровней обработки.

Разработан метод дифференциального уточнения параметров орбитального и углового движений съёмочной системы, в котором число используемых опорных точек существенно сокращается за счет применения точной динамической модели данных об орбитальном и угловом движении КА и данных о точ-

ностях параметров орбитального и углового движения. Согласно этому методу по уравнениям (2) для каждой опорной точки  $(x, y, h)_i$ , отождествленной на местности, составляются линеаризованные уравнения

$$\mathbf{A}_i \delta \mathbf{P}_{V\Omega} = \mathbf{L}_i + \nabla_i, \quad (6)$$

где  $\mathbf{A}_i$  - матрица частных производных измеряемых величин  $(x, y, h)_i$  по определяемым параметрам  $\mathbf{P}_{V\Omega} = [X, Y, Z, \alpha, \omega, k]_1$ ;  $\delta \mathbf{P}_{V\Omega}$  - вектор поправок к определяемым параметрам;  $\mathbf{L}_i$  - вектор свободных членов;  $\nabla_i$  - погрешности координат, обусловленные ошибками систем навигации и ориентации КА. Для их решения используется итерационный метод Ньютона в сочетании со способом наименьших квадратов. Для этого составляется система нормальных уравнений

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{xyh} \mathbf{A} + \mathbf{Q}_{V\Omega}) \delta \mathbf{P}_{V\Omega} = \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{xyh} \mathbf{L}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{Q}_{V\Omega}$  - весовая матрица параметров внешнего ориентирования, а  $\mathbf{Q}_{xyh}$  - матрица, учитывающая неравноточность измерений координат на разномасштабных картах или GPS - измерений.

На каждой  $j$ -ой итерации определяются поправки к параметрам внешнего ориентирования  $\delta \mathbf{P}_{V\Omega_j} = (\mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{xyh} \mathbf{A} + \mathbf{Q}_{V\Omega})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{xyh} \mathbf{L}$  и сами значения параметров  $\mathbf{P}_{V\Omega_j} = \mathbf{P}_{V\Omega_{j-1}} + \delta \mathbf{P}_{V\Omega_j}$ . Итерационный процесс заканчивается при стабилизации ошибки единицы веса  $|\mathbf{L}^T \mathbf{Q}_{xyh} \mathbf{L}_j - (\mathbf{L}^T \mathbf{Q}_{xyh} \mathbf{L})_{j-1}| \leq \varepsilon$ . Уточненные элементы внешнего ориентирования  $\mathbf{P}_{V\Omega}$  используются при решении задач ортотрансформирования изображений и обработки блока изображений.

Предложен алгоритм использования линейных объектов местности в качестве опорных данных, в котором предлагается линейный объект задавать в виде 2-х коррелируемых точек местности. В этом случае опорное направление может быть представлено корреляционной матрицей и использовано в задаче геодезического ориентирования, аналогично опорным точкам,

$$\mathbf{K}_{u_i} = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{u_i}^2 \end{bmatrix}, \quad (\sigma_i^2 \gg \sigma_{u_i}^2, \quad u = 1, 2), \quad \text{где } \sigma_i, \sigma_{u_i} - \text{СКО координат вдоль и поперек опорного направления.}$$

Разработана методика калибровки параметров внутреннего ориентирования съемочной системы на основе участков местности, имеющих точную картографическую основу. Калибровка выполняется в несколько этапов. На первом этапе обрабатываются отдельные сканы по методу дифференциального уточнения параметров внешнего ориентирования. На втором этапе выполняется статистическая обработка результатов уточнения параметров ориентирования отдельных сканов для заданного интервала времени. Для этого по каждому из определяемых параметров  $p$  составляются «взвешенные» суммы:

$$S_{\sigma_p}^2 = \sum_{u=1}^U (p / \sigma_p^2)_u, \quad S_{\sigma_p} = \sum_{u=1}^U (\sqrt{p / \sigma_p^2})_u, \quad S_{\sigma_p}^2 = \sum_{u=1}^U (p^2 / \sigma_p^2)_u,$$

где  $U$  – общее число сканов, принятых в обработку. Значение параметра  $p$  вычисляется по формулам  $p = S_{\sigma_2}^p / S_{\sigma^2}$ ,  $\sigma_p = \sqrt{\left( S_{\sigma_2}^p / S_{\sigma^2} \right) - p}$ .

На третьем этапе по изображениям контрольного полигона, отличного от полигона калибровки, выполняется оценка достоверности полученных параметров. Критерием достоверности параметров на  $k$ -ом шаге является выполнение условия повышения точности полученных координат по сравнению с координатами, полученными на  $(k-1)$ -ом шаге калибровки,

$$\left[ \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2)} \right]_k < \left[ \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2)} \right]_{k-1},$$

где  $\Delta x_i^2$ ,  $\Delta y_i^2$  – невязки координат контрольных точек тестового полигона.

*В третьей главе предложены единая методика для оценки априорных и апостериорных точностных характеристик изображений и метод ортотрансформирования космических изображений, обеспечивающий прямое вычисление геодезических координат элементов изображения. Разработан комплекс алгоритмов геометрического совмещения блока перекрывающихся снимков*

Разработана методика оценки точности изображений, основанная на методе статистических испытаний (методе Монте-Карло). Методика базируется на принятых в международной практике критериях оценки геометрического качества сканерной информации и позволяет оценить суммарную ошибку определения координат пикселей преобразованного изображения (точность геопривязки  $\sigma_g$ ) и ее случайную составляющую (точность взаимного положения контуров  $\sigma_v$ ) в соответствии с формулами:

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2)}, \quad \sigma_v = \sqrt{\frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (\tilde{\Delta} x_{ij}^2 + \tilde{\Delta} y_{ij}^2)}, \quad (8)$$

где  $\Delta x_{ij} = x_i - x_{ij}^v$ ,  $\Delta y_{ij} = y_i - y_{ij}^v$  – разности детерминированных и возмущенных координат  $I$  точек местности, полученных в  $J$  испытаниях;  $\tilde{\Delta} x_{ij} = \Delta x_{ij} - \bar{\Delta} x$ ,  $\tilde{\Delta} y_{ij} = \Delta y_{ij} - \bar{\Delta} y$ ,  $\bar{\Delta} x = \frac{1}{JI} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \Delta x_{ij}$ ,  $\bar{\Delta} y = \frac{1}{JI} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \Delta y_{ij}$ .

Методика позволяет оценить вклад ошибки каждого искажающего фактора в суммарную ошибку, что важно при получении априорных геометрических характеристик видеоинформации и при проектировании новых систем ДЗЗ с точки зрения прогнозирования их тактико-технических параметров.

Предложен метод ортотрансформирования изображений, в котором определение координат точек местности осуществляется путем совместного решения уравнения проектирующего луча с локальным участком рельефа, имеющим аналитическое описание. Показана эффективность предложенного метода по отношению к традиционному подходу.

Для описания локального участка земной поверхности предложено использовать уравнение третьей степени

$$h = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^{3-i} C_{ij} x^i y^j. \quad (9)$$

При построении модели рельефа вводятся априорные данные о характере рельефа, которые представляются в виде корреляционной матрицы, построенной для сетки  $(J \times J)$  равномерно расположенных пикетных точек,

$$\mathbf{K}_{hp} = \sigma_{hp}^2 \begin{bmatrix} 1 & r_{p1,2} & \dots & r_{p1,J} \\ r_{p2,1} & 1 & \dots & r_{p2,J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{pJ,1} & r_{pJ,2} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Здесь в качестве корреляционной функции предлагается функция вида  $r = e^{-2.3S/\tau}$ , где  $S$  – расстояние между точками,  $\tau$  – длина радиуса корреляции, 2.3 – коэффициент, соответствующий  $r < 0.1$ . Показано, что корреляционная функция достоверно описывает поле искажений случайной величины при функциональной зависимости дисперсии от расстояния между точками. Величина  $\sigma_{hp}$  задает характер многочлена в области, ограниченной  $\tau_{hp}$ , а  $\tau_{hp}$  задает размер площадки, на которой многочлен должен сохранять требуемые свойства.

Для определения коэффициентов полинома (9) составляется система нормальных уравнений вида

$$(\Phi^T \mathbf{K}_h^{-1} \Phi + \mathbf{K}_C^{-1}) \tilde{\mathbf{C}} = \Phi^T \mathbf{K}_h^{-1} \mathbf{H}, \quad (11)$$

где  $\Phi = [\Phi_1^T, \dots, \Phi_l^T]^T$ ;  $\Phi_i = [1, x, y, x^2, y^2, x^2y, xy^2, x^3, y^3]_i^T$ ;  $\mathbf{K}_C = \mathbf{G} \mathbf{K}_{hp} \mathbf{G}^T$  – матрица коэффициентов полинома;  $\mathbf{G} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T$ ;  $\mathbf{H} = [h_1, \dots, h_l]^T$ .

Точность построения локальной модели рельефа в произвольной точке  $k$  оценивается средней квадратичной ошибкой  $\sigma \tilde{h}_k = \sqrt{\Phi_k \mathbf{K}_C \Phi_k^T}$ , где  $\mathbf{K}_C = (\Phi^T \mathbf{K}_h^{-1} \Phi + \mathbf{K}_C^{-1})^{-1}$  – обратная матрица системы уравнений (11).

Разработаны алгоритмы построения блочной триангуляции. Основной замысел построения блока снимков заключается в реализации связей между параметрами  $m, m'$  перекрывающихся снимков посредством общих точек. Ориентирование блока изображений выполняется итерационным способом. На каждой итерации выполняется геодезическое ориентирование одиночных изображений. При этом в качестве опорных данных используются уточненные координаты общих точек местности и опорные точки. Такой подход позволяет объединять в блоке изображения, полученные разнотипными съемочными системами.

Вычисление координат общих точек для снимков  $m$  и  $m'$  выполняется по формулам прямой фотограмметрической засечки с использованием средней высоты местности. По вычисленным координатам определяются средне-

взвешенные значения координат общей точки  $\bar{x}_i = (p_i^m x_i^m + p_i^{m'} x_i^{m'}) / (p_i^m + p_i^{m'})$ ,  $\bar{y}_i = (p_i^m y_i^m + p_i^{m'} y_i^{m'}) / (p_i^m + p_i^{m'})$ , где  $p_i^m = 1/(\sigma_{xy}^m)^2$ ,  $p_i^{m'} = 1/(\sigma_{xy}^{m'})^2$  веса плановых координат общих точек для снимков  $m$  и  $m'$ .

Средние координаты общих точек при выполнении геодезического ориентирования снимков  $m$  и  $m'$  добавляются к координатам опорных точек местности с весами  $p_i^{mm'} = 1/[(\sigma_{xy}^m)^2 + (\sigma_{xy}^{m'})^2]$ .

Предложены два набора показателей, характеризующих точность объединения снимков в блок. Первый из них оценивает качество связей изображений в блоке в виде систематической и среднеквадратической ошибки невязок координат общих точек. Второй показатель позволяет оценить качество геодезической привязки контуров к абсолютной системе координат. Приводятся соотношения для расчета этих показателей.

*В четвертой главе рассматриваются вопросы реализации в программном обеспечении разработанных модели съемки, методик и алгоритмов; предлагается унифицированный алгоритм фильтрации грубых ошибок измерений, используемый на всех этапах обработки изображений; экспериментально доказывается работоспособность и высокая эффективность предложенных технологий*

Предложен унифицированный алгоритм фильтрации грубых ошибок измерений опорной информации на основе порядковых статистик, позволяющий повысить достоверность и точность вычисления параметров геометрической обработки изображений.

Показано, что программное обеспечение (ПО) обработки космической информации, отвечающее современным требованиям, помимо решения специальных задач, изложенных в предыдущих главах, должно работать с большими потоками данных (десятки Гбайт), поддерживать различные растровые, векторные и числовые форматы представления как самих космических изображений, так и геопространственных данных, реализовывать преобразования изображений в различные картографические проекции, выполнять геокодирование объектов местности и обладать мощным вспомогательным и сервисным инструментарием. В диссертации предлагается структурная схема программного обеспечения, удовлетворяющего выдвинутым требованиям.

В основе ПО лежат две базовые компоненты, отвечающие за управление (ядро управления) и информационное обеспечение (информационное ядро). Функциональные компоненты входят в систему по правилам, установленным базовыми компонентами. Наиболее эффективным механизмом для организации функциональных компонент с точки зрения интеграции программ, написанных разными разработчиками на разных языках, являются dll – библиотеки, в описании интерфейсной части которых устанавливаются правила их взаимодействия с управляющим ядром и друг с другом. Опыт разработки программной сис-

темы подтвердил эффективность объединения программ, написанных в системах программирования Visual C, Bulder (язык C++) и Delphi (язык Pascal).

На базе предложенной схемы реализовано семейство программных систем «OrthoScan», «NormScan», «OrthoNormScan» и др., предназначенных для обработки информации от КА «Аркон», «Монитор-Э» и «Ресурс-ДК». Эти системы используются в Научном центре оперативного мониторинга Земли, ГКНЦ им. М.В. Хруничева и в/ч 54023.

Выполнены экспериментальная апробация и оценка эффективности разработанных методов и технологий геометрической обработки изображений. В результате установлено, что:

- метод дифференциального уточнения параметров внешнего ориентирования обеспечивает высокоточную геопривязку протяженных маршрутов по 4-м и даже по 2-м опорным точкам;
- опорное направление, в зависимости от его ориентации, может превосходить по информативности опорную точку при определении углов ориентирования;
- метод ортотрансформирования обладает высокой производительностью и надежностью определения координат элементов земной поверхности, в том числе при экстремальных условиях съемки под углом наклона до  $84^\circ$ .

Экспериментально подтверждена возможность уточнения параметров внутреннего ориентирования съемочной системы по снимкам земной поверхности при наличии точных данных об угловом положении и движении КА и точных топографических карт на снимаемую территорию.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Выполнен комплексный анализ проблемы точных геометрических преобразований космических изображений. Показано, что используемые в системах ДЗЗ среднего и низкого пространственного разрешения методы и модели обработки не могут быть применены для коррекции видеоданных высокого пространственного разрешения, поскольку не обладают необходимой точностью, не учитывают специфику формируемых изображений и не обеспечивают функциональной полноты решаемых задач. Сформулированы направления по созданию высокоточных методов и полнофункциональных технологий обработки изображений от существующих и вновь проектируемых российских систем ДЗЗ высокого разрешения.

2. Разработана прецизионная модель сканерной съемки земной поверхности, основанная на строгом математическом описании процессов формирования видеоданных в условиях орбитального полета КА и позволяющая рассчитать геоцентрические и картографические координаты каждого пикселя исходного изображения. В отличие от моделей, используемых в системах ДЗЗ среднего и низкого пространственного разрешения, полученные соотношения учитывают искажающее действие оптоэлектронного тракта, линейное и угловое движение спутника, измеряемое высокоточными навигационными системами и системами астроориентации, фигуру Земли и ее гравитационного поля, а также сред-

ную высоту местности и динамическую модель атмосферы. Модель спроектирована в унифицированном виде, используется для всех типов систем ДЗЗ высокого разрешения и лежит в основе технологии обработки изображений по орбитальным данным.

3. Получена математическая модель геометрического восстановления непрерывного изображения из отдельных перекрывающихся фрагментов, формируемых многоматричными сканирующими датчиками. Модель описывает топологию построения оптико-электронной съемочной системы высокого пространственного разрешения и позволяет рассчитать параметры взаимного перекрытия фрагментов на основе аппроксимации уравнений геопривязки видеоданных от каждой ПЗС-матрицы.

4. Предложен и экспериментально исследован метод дифференциального уточнения орбитального и углового движения съемочной системы, в котором за счет использования полной модели съемки, измерений от систем навигации и астроориентации, а также данных об их точностях, удается уменьшить число используемых опорных точек до четырех. Метод позволяет реализовать технологию высокоточного спутникового картографирования территорий, имеющих ограниченное топогеодезическое обеспечение.

5. Предложен алгоритм использования линейных объектов в качестве опорных данных, согласно которому опорное направление, рассчитываемое по линейному объекту, представляется корреляционной матрицей, используемой в задаче уточнения параметров внешнего ориентирования съемочной системы, аналогично тому, как это осуществляется при применении опорных точек.

6. Разработана методика уточнения параметров внутреннего ориентирования съемочной системы, позволяющая повысить точность геопривязки видеоданных за счет компенсации искажающих факторов, связанных с деформацией оптической системы и фокальной плоскости, и основанная на статистической обработке контрольных измерений, получаемых при съемке опорных полигонов, и отделении систематических ошибок от случайных.

7. Предложена единая методика для оценки априорных и апостериорных геометрических характеристик исходных и обработанных по орбитальным параметрам изображений, основанная на методе статистических испытаний Монте-Карло и позволяющая оценить как адекватность моделей обработки, так и корректность их программной реализации. Методика базируется на принятых в международной практике критериях оценки геометрического качества сканерной информации в виде систематической (точность геопривязки) и случайной (точность взаимного положения контуров) составляющих ошибки определения координат пикселей изображения.

8. Предложена технология ортотрансформирования космических изображений, основанная на совместном решении уравнения прямой фотограмметрической засечки с уравнением, описывающим рельеф локального участка земной поверхности. Экспериментально подтверждено, что метод обеспечивает высокоточное и надежное определение координат точек местности при экстремаль-



ных условиях съемки, выполненной под углом наклона  $84^\circ$  к плоскости горизонта.

9. Разработан алгоритм совместной обработки блока перекрывающихся снимков, в котором принцип объединения изображений основан на методе дифференциального уточнения параметров внешнего ориентирования одиночных кадров с привлечением в качестве дополнительных измерений координаты связующих точек, определяемых по перекрывающимся изображениям. Предложенный подход не накладывает ограничений на размеры блока одновременно обрабатываемых снимков и позволяет реализовать технологию получения бесшовного мозаичного кадра требуемой территории по изображениям от различных систем ДЗЗ.

10. Решена задача практической реализации разработанных в диссертации методов и технологий геометрической обработки видеoinформации высокого пространственного разрешения: предложен унифицированный алгоритм фильтрации грубых ошибок измерений на основе порядковых статистик; разработана гибкая структура программного обеспечения геометрической обработки спутниковых видеоданных, охватывающая весь перечень решаемых задач и позволяющая конфигурировать различные технологические операции координатных преобразований изображений. На базе предложенной структуры спроектировано семейство программных систем геометрической обработки материалов съемки от существующих и планируемых к запуску КА «Монитор-Э», «Аркон», «Ресурс-ДК» и др.

По результатам экспериментальной апробации на реальной и модельной информации установлено явное преимущество предложенных в диссертации технических решений по сравнению с традиционными подходами, использующими обобщенные модели съемки.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гомозов О.А., Корноухов К.В., Погорелов В.В., Чумаков С.В. Использование линейных объектов карт при внешнем ориентировании фотоснимков // Геодезия и картография. 1993. № 4. С. 24-29.

2. Гомозов О.А., Колесников В.Н., Погорелов В.В. Выявление грубых измерений с использованием порядковых статистик // Геодезия и картография. 1994. № 7. С. 24-29.

3. Гомозов О.А., Лось В.В., Сухов А.А. Современные требования к составу и точностным характеристикам бортовых систем КА ДЗЗ, выдвигаемые наземными средствами обработки // Тез. докл. 3-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2000. С. 301-302.

4. Гомозов О.А., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е. Концепция построения технологий обработки данных от космической системы «Монитор-Э» // Тез. докл. 4-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2003. С. 300.

5. Гомозов О.А., Лось В.В., Сухов А.А. Современные методы решения координатных задач по космическим изображениям высокого пространствен-

ного разрешения // Тез. докл. 4-й междунар науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2003. С. 285-287.

6 Гомозов О.А. Оценка влияния ошибок оптико-электронных систем КА ДЗЗ на точность геометрической обработки изображений. Рязань: РГРТА, 2004. 11 с. Деп. в ВИМИ 03.09.04, № ДО-8957.

7. Гомозов О.А. Модель геометрических преобразований спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Тез. докл. IX всероссийск. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань, 2004. С. 178.

8 Гомозов О.А. Методология высокоточных геометрических преобразований космической информации ДЗЗ, получаемой оптико-электронными системами высокого пространственного разрешения // Междунар. молодежн. науч.-техн. конф. «XXX Гагаринские чтения». М., 2004. С. 401-402.

9. Гомозов О.А., Лось В.В., Сухов А.А., Соловьева К.К., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е. Технологии обработки данных от оптико-электронных спутниковых систем высокого разрешения // Тез. докл. «2-я воен.-науч. конф. космических войск. ВКА им. А.Ф. Можайского». 2004. С. 38-39.

10. Гомозов О.А., Лось В.В. Уточнение параметров внутреннего ориентирования оптико-электронного съемочного устройства по снимкам земной поверхности // Тез. докл. 13-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2004. С. 196-197.

11. Гомозов О.А. Аналитическое решение прямой фотограмметрической засечки при ортотрансформировании снимков // Тез. докл. 13-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникации». Рязань, 2004. С. 102-103.

12. Гомозов О.А., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Лось В.В., Соловьева К.К., Сухов А.А. Обработка космических изображений высокого пространственного разрешения, получаемых оптико-электронными КА ДЗЗ // Тез. докл. II всероссийск. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва ИКИ РАН, 2004. С. 39-41.

13. Гомозов О.А., Кузнецов А.Е., Лось В.В., Пресняков О.А. Структурное восстановление изображений, формируемых многоматричными сканирующими датчиками // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах. Межвуз. сб. научн. тр. Рязань: РГРТА, 2004. С. 88-96.

14. Гомозов О.А. Разработка программного обеспечения обработки материалов космической съемки высокого пространственного разрешения. Рязань: РГРТА, 2004. 14 с. Деп. в ВИМИ 03.03.04, № ДО-8945.

**Гомозов Олег Анатольевич**

**МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
КОСМИЧЕСКОЙ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ  
ОТ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОГО  
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 29.04.05г. Формат бумаги 60×80 1/16.  
Бумага офисная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.  
Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз.

Редакционно-издательский центр  
Рязанской государственной радиотехнической академии.  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

№ - 9 2 2 2

РНБ Русский фонд

2006-4

5497