

На правах рукописи

ШАВУК ВИТАЛИЙ СТЕПАНОВИЧ

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ЦИФРОВОЙ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ
КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

Специальность 25.00.34 –
аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2009

Диссертационная работа выполнена на кафедре аэрофотогеодезии
Государственного университета по землеустройству.

Научный руководитель: доктор технических наук
Чекалин Владимир Федорович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Тюфлин Юрий Сергеевич
кандидат технических наук
Лавров Виктор Николаевич

Ведущая организация: **Федеральное государственное унитарное
предприятие «Центральный ордена
«Знак Почета» научно-исследовательский
институт геодезии, аэросъемки и картографии
им. Ф.Н. Красовского», ФГУП «ЦНИИГАиК»**

Защита диссертации состоится « 26 » ноября 2009 г. в 12 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.143.01 в Московском государственном
университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064,
г. Москва, Гороховский пер., 4, зал заседаний.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного университета геодезии и картографии.

Автореферат разослан « 10 » октября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета

Б.В.Краснопевцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы исследования. В последнее время на российском рынке появились и прочно закрепились на нем отечественные цифровые фотограмметрические системы - «PHOTOMOD», ЦФС ЦНИИГАиК, «Галка», «Z-Space», «ФОТОПЛАН», «OrthoScan» и др. Только за 2006 г. в нашей стране было внедрено 1400 ЦФС ЦНИИГАиК и 1200 ЦФС «Галка». Однако их программное обеспечение и применяемые методы обработки, в основном, копируют технический облик и технологии аналитических приборов. К тому же, их программное обеспечение не позволяет использовать полностью потенциальные возможности современных материалов космической съемки. Т.е., имеется насущная практическая потребность в создании цифровой фотограмметрической системы (ЦФС), построенной по технологическому принципу, позволяющей производить строгую фотограмметрическую обработку снимков любого типа, доступной по стоимости и имеющую удобный интерфейс.

Результаты исследований по данному научному направлению составили теоретический фундамент фотограмметрического обеспечения существующих ЦФС, содержание которого в настоящий момент до конца еще не сложилось, и послужили отправной точкой научных изысканий автора по данной актуальной тематике.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются методы и технологии проектирования фотограмметрических приборов.

Предметом исследования является технический облик и фотограмметрическое обеспечение ЦФС «Ortho/Neva», предназначенной для обработки космических снимков сканерного типа.

Цель и задачи исследования. Целью исследований диссертационной работы является разработка теоретических и методологических основ фотограмметрического обеспечения ЦФС, предназначенной для строгой обработки современных космических снимков полученных сканерными съемочными системами. Главные ее аспекты включают:

- обоснование технического облика базовой модели цифровой фотограмметрической системы;
- разработку и апробацию строгих методов обработки спутниковых изображений сканерного типа.

Основные **задачи** диссертационной работы, определяемые поставленной целью, состоят в следующем:

1. Анализ метрических свойств современных космических снимков, полученных с помощью оптико-электронных сканирующих систем.

2. Разработка технического облика ЦФС для обработки космических снимков сканерного типа:

- разработка основных требований к фотограмметрическому обеспечению ЦФС для обработки космических снимков сканерного типа.

- обоснование структуры, функциональных возможностей и технических характеристик базовой модели ЦФС для фотограмметрической обработки космических снимков сканерного типа.

3. Теоретическое обоснование строгой математической модели динамического типа для сканерных снимков, включающее параметры текущего времени формирования исходного изображения, включающее:

- определение основных принципов формирования геометрии космических снимков сканерного типа;
- исследование адекватности различных математических моделей, используемых для внешнего ориентирования сканерных снимков.

4. Экспериментальные исследования точности обработки космических снимков, полученных в синхронном и асинхронном режимах съемки.

Методы исследования. Решение поставленных задач выполнено с использованием методов цифровой фотограмметрии, теории ошибок и метода наименьших квадратов, математической картографии и компьютерной графики. Для проверки правильности основных теоретических положений разработанного фотограмметрического обеспечения ЦФС использован экспериментальный метод исследований.

Экспериментальные исследования осуществлены с помощью цифровой

системы «Ortho/Neva» на основе обработки производственных материалов космической съемки.

Научная новизна. Основные результаты диссертационной работы, представляющие научную новизну и выносимые на защиту:

1. Разработаны и теоретически обоснованы:

- метод динамического типа фотограмметрической обработки космических снимков, полученных оптико-электронными сканерными съемочными системами, включающий параметры времени формирования сканерного изображения;

- технический облик цифровой фотограмметрической системы для обработки космических снимков сканерного типа.

2. Сформулирован и теоретически обоснован принцип неопределенности внешнего ориентирования космического изображения сканерного типа;

3. Разработана методика априорной оценки точности определения координат точек объектов по сканерным космическим снимкам в зависимости от параметров съемочной системы и характеристик измерительных систем;

4. Разработан метод определения приближенных значений элементов внешнего ориентирования сканерной съемочной системы;

5. Исследована величина обусловленности Cond A системы исходных уравнений поправок при внешнем ориентировании спутниковых изображений различного типа.

Обоснованность научных положений подтверждена результатами экспериментальных исследований по внешнему ориентированию космических снимков сканерного типа и производственных работ по обновлению крупномасштабных цифровых карт и планов городов по космическим снимкам высокого разрешения.

Практическая значимость результатов исследования. Разработанные фотограмметрическое обеспечение и программные модули, которые реализованы в базовой модели цифровой фотограмметрической системы «Ortho/Neva», позволяют производить строгую фотограмметрическую обработку современных материалов космического ДЗЗ сканерного типа:

GeoEye, WorldView-1, QuickBird, IKONOS, OrbView-3, SPOT, Alos, IRS.

Апробация и реализация результатов исследования. Основные результаты исследований опубликованы в 3-х научных статьях и 2-х докладах на научно-технических конференциях.

В настоящее время в Сев. - Кав. АГП с использованием разработанной цифровой фотограмметрической системы выполняются производственные работы по государственным контрактам с Роскартографией и картографическим проектам коммерческих организаций по созданию ортоизображений в масштабах 1:5 000 – 1:25 000. За 2006-2008 г.г. выполнены проекты по созданию картографической продукции на территорию Северного Кавказа общей площадью свыше 140 000 км².

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает оглавление, введение, три главы, заключение, список литературы и приложение. Общий объем диссертационной работы - 125 страниц машинописного текста, она содержит 32 рисунка, 16 таблиц и 1 приложение. Список литературы включает 119 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **введении** обоснована актуальность темы, установлена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов.

В **первой главе «Обоснование технического облика цифровой системы обработки космических снимков высокого разрешения»** выполнен анализ метрических свойств современных космических изображений сканерного типа, разработаны основные требования к фотограмметрическому обеспечению и технический облик базовой модели цифровой фотограмметрической системы.

Практическая возможность создания измерительных картографических документов определяется метрическими свойствами исходных космических изображений. Под ними понимается совокупность геометрических и изобразительных свойств космических снимков, которые обуславливают

конечную точность фотограмметрических определений объектов местности, изобразившихся на них. При этом определены две их точностные категории: потенциальные измерительные возможности и реальные измерительные свойства.

Под потенциальными измерительными возможностями цифровых изображений понимается теоретически возможный минимум погрешности $\sigma_{изм.}$ измерения объектов местности, величина которой зависит от влияния двух основных факторов:

- искажений геометрии изображения - $\sigma_{иск.}$;
- изобразительных свойств исходного изображения - $\sigma_{изобр.}$.

При указанном подходе общая зависимость, определяющая уровень потенциальных измерительных возможностей изображения космического снимка, представляется в виде:

$$\sigma_{изм.}^2 = \sigma_{иск.}^2 + \sigma_{изобр.}^2 . \quad (1)$$

Величина геометрической составляющей $\sigma_{иск.}$ цифровых космических изображений достаточно широко освещена в различных литературных источниках и ее оценка колеблется в пределах: 0.5-1.0 pxl.

Влияние второй составляющей погрешности измерения $\sigma_{изобр.}$ проявляется в возникновении погрешности идентификации $\sigma_{идент.}$ объектов местности на изображении. Величина последней зависит, в основном, от разрешающей способности R и контраста K цифрового изображения. В работе предложена формула для оценки величины $\sigma_{идент.}$ с учетом тонового контраста ΔK изображения:

$$\sigma_{идент.} = \frac{d}{2 \cdot (\Delta K - 0.019)^{0.66}} . \quad (2)$$

На основе (1) и (2) определен теоретический предел потенциальных измерительных возможностей для наиболее используемых космических снимков: GeoEye, Worldview-1, QuickBird, IKONOS, OrbView-3, SPOT-5, Alos.

Таблица 1.

Тип погрешности	GeoEye	World view-1`	QuickBird	IKONOS	OrbView-3	SPOT-5	Alos
$\sigma_{идент}$	0.30-0.45 м	0.40-0.55 м	0.45-0.60 м	0.75-1.0 м	0.75-1.0 м	1.8-2.5 м	1.8-2.5 м
$\sigma_{изм.}$	0.36-0.57 м	0.45-0.70 м	0.54-0.85 м	0.86-1.41 м	0.86-1.41 м	2.54-2.79 м	2.54-2.79 м

Реальный уровень измерительных свойств обрабатываемого снимка, извлекаемый из него на практике, зависит от характеристик используемых измерительных средств, психо-физиологических свойств человека-оператора и степени совершенства принятых методов обработки цифровых изображений. В этом случае, в зависимости от условий наблюдения, возникают новые виды погрешностей измерения, которые включают погрешность идентификации $\sigma_{идент.}$ как базовую составляющую:

$$- \text{ погрешность наведения курсора: } \sigma_{нав.}^2 = \sigma_{идент.}^2 + \sigma_{инст.}^2 \quad (3)$$

где $\sigma_{инстр.}$ - инструментальная погрешность ЦФС;

$$- \text{ погрешность визирования: } \sigma_{визир.}^2 = \sigma_{идент.}^2 + \sigma_{инст.}^2 + \sigma_{дин.}^2 \quad (4)$$

где $\sigma_{дин.}$ - погрешность, возникающая при движении курсора;

$$- \text{ погрешность отождествления: } \sigma_{отожд.}^2 = \sigma_{визир.}^2 + \sigma_{марк.}^2 \quad (5)$$

где $\sigma_{марк.}$ - погрешность маркировки отождествляемой точки.

Автором получены формулы, позволяющие априорно оценивать точность внешнего ориентирования одиночного космического снимка и построения стереомодели местности на ЦФС при создании ортоизображений и ЦМР соответственно. При этом были рассмотрены как кадровые снимки, так и изображения сканерного типа соответственно:

$$\sigma_{X.Y}^2 = \frac{m^2 \cdot \sigma_{изм.}^2}{2(0.33n - 1)} + \sigma_S^2 + \frac{r^2}{f^2 \cos^2 \varepsilon} \cdot \sigma_H^2, \quad (6)$$

$$\sigma_{X.Y}^2 = \frac{m^2 \cdot \sigma_{изм.}^2}{2(0.16n - 1)} + \sigma_S^2 + \frac{r^2}{f^2 \cos^2 \varepsilon} \cdot \sigma_H^2, \quad (7)$$

где $\sigma_{изм.}$ - ср. кв. погрешность измерения пиксельных координат снимка;

σ_S - ср. кв. погрешность положения опорных точек в плане;

σ_H - ср. кв. погрешность положения опорных точек по высоте;

- n - количество используемых опорных точек;
- r - расстояние опорной точки от начала координат снимка;
- ε - угол наклона проектирующих лучей при сканировании местности;
- f - фокусное расстояние снимка;
- m - знаменатель масштаба снимка.

Одним из эффективных методов проектирования сложных технических систем является метод планирования их эволюционного развития. Этот метод предусматривает разработку двух моделей одновременно: идеальной и реальной. Идеальная модель ЦФС имеет структуру, основные функциональные возможности и технические характеристики, не ограниченные уровнем развития вычислительных и аппаратных средств, а также финансовыми возможностями. Она является конечной версией развития ЦФС, к которой на практике постепенно приближаются все модификации базовой модели.

Первый (базовый) вариант реальной модели ЦФС создается на основе прообраза идеальной с учетом имеющихся на текущий момент проектирования технических и финансовых ограничений. По результатам указанных разработок составляется план эволюционного развития базовой модели ЦФС в направлении ее идеальной модели.

В работе был разработан технический облик базовой модели ЦФС, который определен следующими основными элементами технического проекта:

1. Назначение, принцип действия проектируемой ЦФС и вычислительная среда программных средств, включая информационное обеспечение.
2. Структура и основные технические характеристики проектируемой ЦФС.
3. Технология работы и функциональные задачи системы.
4. Фотограмметрическое обеспечение проектируемой ЦФС.

Указанные элементы рассмотрены и теоретически обоснованы в работе.

В основу принципа действия ЦФС «Ortho/Neva» был положен технологический принцип функционирования всех программных модулей

системы под управлением ее главного меню, которое включает два основных режима вычисления: арифметический и реального времени.

В обычном вычислительном (арифметическом) режиме производится решение фотограмметрических задач, обеспечивающих ввод исходных данных и их конвертирование в рабочие форматы обработки, геопривязку исходного космического снимка на основе RPC-полиномов, внешнее ориентирование одиночного космического изображения, создание ЦМР и TIN-моделей рельефа, ортотрансформирование исходного изображения и преобразование используемых геодезических систем координат.

В режиме реального времени производится периодическое решение прямой фотограмметрической засечки. В данном режиме выполняются технологические процедуры, связанные с отображением изображений, перемещением курсора, измерением пиксельных и геодезических координат точек снимка на экране монитора.

Основной задачей последующего проектирования являлась разработка структуры базовой версии ЦФС «Ortho/Neva», логических взаимосвязей между ее основными компонентами, включая их функционирование как в виде отдельного рабочего места, так и в составе локальной вычислительной сети, функциональное наполнение отдельных модулей системы. При этом необходимо было обеспечить подключение всех компонентов ЦФС к управляющему модулю системы, ее сопряжение с внешними системами без потери функциональности и отсутствия перерывов в работе.

Конечный этап проектирования содержит разработку технологии создания конечного продукта и связанного с ней перечня функциональных задач системы, реализуемых в дальнейшем в ее программном обеспечении.

В данной главе дано также детальное описание каждой процедуры разрабатываемой технологической схемы.

В заключительном разделе главы разработаны общие и специальные требования к фотограмметрическому и программному обеспечению ЦФС «Ortho/Neva».

Общие требования к фотограмметрическому обеспечению (ФО) базовой модели ЦФС «Ortho/Neva» можно сформулировать следующим образом:

- Фотограмметрическое обеспечение должно базироваться на строгих математических решениях задач фотограмметрии, геодезии и картографии, чтобы обеспечить полное использование метрической точности цифровых космических изображений. Используемые при этом алгоритмы должны обеспечивать максимальный контроль правильности выполнения основных технологических процессов.
- Программное обеспечение должно гарантировать решение задачи во всех случаях, когда оно теоретически возможно. При этом недопустимы какие-либо ограничения, связанные с быстродействием и объемом памяти используемых компьютеров.
- Интерфейс должен обеспечивать удобство работы оператора с ЦФС. Составляющей частью программной документации должна служить хорошо развитая справочная информация.
- Разрабатываемые программные средства должны обеспечивать:
 - внутреннее ориентирование космических снимков;
 - внешнее ориентирование по произвольному числу плановых, высотных, планово-высотных опорных точек;
 - ввод цифровой информации о рельефе в виде горизонталей, профилей, регулярной и нерегулярной сетки ЦМР, отдельных пикетов, урезов воды, структурных линий и т.д.;
 - представление цифровой информации в широко распространенных форматах и в виде графических копий.

Используемое программное обеспечение должно обеспечивать стабильные результаты точности независимо от масштаба картографирования, физико-географических условий района работ и условий космической съемки.

Специальные требования к фотограмметрическому обеспечению:

1. Необходимым условием разработки фотограмметрического и, соответственно, программного обеспечения ЦФС «Ortho/Neva» является обеспечение их технологической связанности. В этой связи:

- программный комплекс должен иметь модульную структуру, которые связаны друг с другом последовательностью выполняемых технологических процессов. При этом система должна проектироваться открытой, допускающей ее совершенствование и доработку базового программного обеспечения.

Тем самым, обеспечивается формирование единой технологической линии получения заданного конечного продукта.

2. Фотограмметрическое обеспечение каждой версии должно обладать возможностью импорта данных и экспорта результатов в одних и тех же форматах. Это позволяет использовать любую версию ЦФС либо самостоятельно, либо совместно с другими ее рабочими версиями, используя достоинства сквозного технологического процесса. Следовательно,

-должна соблюдаться сквозная технология проектирования ЦФС на основе единого набора данных и в единой программной среде для всех ее рабочих версий.

3. Программное обеспечение ЦФС для обработки космических изображений высокого разрешения должно обеспечивать:

-эффективную технологию сбора и обработки той исходной информации, которая в настоящее время является актуальной при создании цифровых карт, включая их векторное и растровое представление. При этом используется максимально широкий спектр источников топографической информации:

- наземной топографической съемки,
- данных, импортируемых из спутниковых систем высокого разрешения,
- существующих топографо-геодезических и картографических материалов на бумажных, пластиковых и других носителях;
- мониторинг и обновление цифровых карт сельскохозяйственных земель и городских территорий.

4. Практически все спутники дистанционного зондирования иностранного происхождения имеют солнечно-синхронную орбиту. Тем самым, обеспечиваются наилучшие условия съемки местности таким спутником. Соответствующие требования к фотограмметрическому обеспечению:

- в состав исходных данных ЦФС «Ortho/Neva» должен входить файл IMD служебной информации спутниковых изображений, содержащий данные по геопривязке, условия съемки, высоту Солнца и др.;

- возможность обработки спутниковых панхроматических изображений с разрешением на местности меньше метра, с радиометрическим разрешением не менее 11 бит/pxl, снятых в синхронном и асинхронном режимах, а также мультиспектральных изображений при наличии 4-х спектральных каналов, в том числе одного инфракрасного;

- возможность обновления картографического материала масштаба 1:2 000 и мельче.

5. В современном производстве цифровая обработка изображений являются основной. В этой связи:

- информация о местности, представленная в цифровом виде, должна быть удобна для хранения и передачи заказчику;

- необходимо иметь расширенные возможности выполнения фотограмметрических работ, включая новые инструменты для измерений и выявления ошибок, обеспечение выравнивания оптических плотностей и цветовых характеристик изображения, а также определение линии сшивки при составлении ортомозаик.

Разработанная базовая модель ЦФС «Ortho/Neva» отвечает указанным выше требованиям.

Во второй главе «Разработка основных теоретических положений фотограмметрического обеспечения цифровой системы «ORTHO/NEVA» определены принципы формирования геометрии космических изображений сканерного типа, исследована степень адекватности различных математических моделей, обоснована математическая модель сканерного снимка динамического типа.

Если цифровое изображение при съемке формируется на плоскости с помощью объектива и матрицы CCD, то геометрия получаемого цифрового снимка соответствует центральной проекции. К этому же типу геометрии

относятся изображения, полученные путем преобразования аналоговых снимков в цифровые.

Снимки сканерного типа получают на борту носителя сразу в цифровом виде путем последовательного формирования всех строк сцены с помощью линейной ПЗС-матрицы.

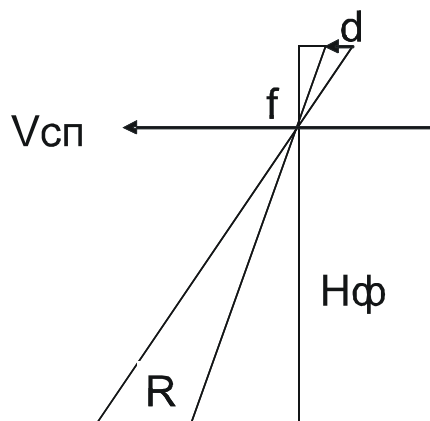


Рис. 1. Формирование пикселя d изображения при оптико-электронном сканировании.

На рис. 1 показана схема формирования текущего пикселя в строке изображения сканерного снимка при движении спутника по орбите высотой H_{ϕ} . Из рисунка с очевидностью следует следующее равенство:

$$R = \frac{H_{\phi}}{f} d. \quad (8)$$

где H_{ϕ} – высота съемки местности;

d - апертура сканирования;

R - разрешение снимка на местности;

f - фокусное расстояние съёмочного объектива.

На основе данного выражения можно определить время Δt формирования одного пикселя изображения при известной скорости $V_{сп}$ полета спутника:

$$\Delta t = \frac{H_{\phi} d}{V_{сп} f}, \quad (9)$$

После формирования текущей строки снимка по мере движения спутника по орбите весь цикл построения изображения повторяется снова для следующей строки. В конечном итоге формируется полный кадр изображения в файловой системе координат.

Формирование кадра (сцены) в нем происходит в реальном масштабе времени по мере пролета спутника над очередной полоской местности шириной R . Каждая строка изображения имеет свой перспективный центр проекции, который располагается на соответствующем месте орбиты в зависимости от текущего времени T_i формирования кадра снимка (синхронный режим):

$$T_i = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots \Delta t_i. \quad (10)$$

С увеличением разрешения изображения пропорционально сокращается время пролета спутника над полоской местности, по ширине соответствующей 1 пикселю снимка. К примеру, для спутниковых изображений типа QuickBird время формирования текущей строки равно порядка $4.1 \cdot 10^{-5}$ сек. За такое малое время не успевает сформироваться изображение местности с необходимым уровнем оптической плотности из-за недостаточной чувствительности детекторов ПЗС-линейки.

В этом случае используются ПЗС-линейки с переносом заряда, что приводит к определенной задержке Δt_i во времени сканирования текущей строки. За это время спутник пролетит по орбите расстояние Δs . Следовательно, текущая строка изображения будет сформирована пучком связей лучей гомологии, центры проектирования которых располагаются на активном отрезке Δs орбиты.

Таким образом, каждому пикселю изображения сканерного снимка соответствует некоторое множество значений элементов внешнего ориентирования (ЭВО) цифровой камеры, которые она последовательно имеет на указанном отрезке орбиты. Описанный режим съемки местности с временной задержкой и накоплением сигнала для каждой строки сцены называется асинхронным.

На основании описанных принципов формирования геометрии космических сканерных изображений можно сделать следующий вывод:

- съемка местности в синхронном или асинхронном режимах приводит к распаду общей связки проектирующих лучей сцены на множество локальных связей, привязанных по времени к своим точкам на активном отрезке Δs

орбиты. Причем в асинхронном режиме эта тенденция проявляется значительно сильнее.

Это означает, что для строгого внешнего ориентирования сканерного изображения должна использоваться математическая модель снимка, в которой уравнения связи координат точек изображения и местности включают необходимую временную составляющую Δt .

С определенного момента времени разработка математических моделей геометрии спутниковых изображений стала одним из приоритетных направлений научных исследований в области ДЗЗ. В работе рассмотрены различные модели снимков с точки зрения определения степени их адекватности геометрии реальных изображений.

В отечественных и иностранных программных пакетах по обработке космических изображений используются различные математические модели снимков. Самые распространенные среди них - классические коллинеарные зависимости центральной проекции и их производные. Широко известны модели снимка: DLT, параллельно-перспективная, аффинная и модель RPC-полиномов.

При обработке космических изображений с помощью вышеуказанных зависимостей ситуация складывается неблагоприятная, поскольку изображение сканерных снимков формируется динамически по законам, отличным от статичных законов центральной проекции. В этой связи возникает неопределенность определения ЭВО сканерных снимков, которая математически проявляется в виде резкого ухудшения обусловленности исходной системы уравнений поправок. Естественно, что в подавляющем большинстве случаев подобное решение обратной фотограмметрической засечки (ОФЗ) оказывается неудовлетворительным.

Чтобы выявить зависимость плохой сходимости решения задачи ОФЗ для сканерных снимков от величины обусловленности $\text{Cond } A$, автором были выполнены экспериментальные работы по определению ее значений при ориентировании спутниковых изображений на основе различных моделей

снимков. Исследованию подлежали 22 системы исходных уравнений поправок, которые составлялись по измерениям опорных точек при

Таблица 2

Тип снимков	Модель RPC-полиномов	Статическая модель кадрового снимка	Динамическая модель сканерного снимка
Кадровые	-	10^{3-4}	10^{18-20}
Сканерные	10^{35-36}	10^{8-12}	10^{26-29}

определении ЭВО сканерных и кадровых снимков. По результатам экспериментальных работ получена обобщенная величина обусловленности исходной системы уравнений поправок для различных математических моделей космических снимков, которая представлена в таблице 2. Из данной таблицы следует:

1. Если в качестве математической модели космического изображения сканерного типа использовать коллинеарные зависимости, то обусловленность исходной системы уравнений поправок снижается почти в третьей степени по сравнению с традиционным решением ОФЗ для кадровых снимков (с 10^{3-4} до 10^{8-12}). Этого оказывается достаточно, чтобы решение ОФЗ космических изображений стало бы неудовлетворительным.

2. Если используется динамическая модель, то происходит дальнейшее падение обусловленности исходной системы до величины $Cond A = 10^{26-29}$. Следовательно, без применения специальных методов решение ОФЗ даже на базе строгой модели геометрии космических снимков также будет неудовлетворительным.

3. Наихудшую обусловленность имеет RPC-модель космических изображений сканерного типа.

За RPC-модель цифровых снимков принимаются отношения рациональных полиномиальных коэффициентов, которые преобразуют географические координаты В, L, Н объекта местности в координаты x, y его

изображения на снимке. Как правило, RPC-полиномы определяются без использования опорных точек. Необходимые данные для вычисления их коэффициентов получают на основе частой регулярной сетки опорных точек, создаваемой на спутниковом изображении с использованием строгой математической модели сенсора. Они обычно содержат систематические ошибки, которые снижают точность геопозиционирования в процессе обработки спутниковых изображений.

Решение исходной системы уравнений поправок при определении ЭВО космических изображений представляет собой большую проблему даже с использованием строгой математической модели снимка. Главная трудность при этом – попадание в область сходимости задачи ОФЗ. Применение метода регуляризации академика Тихонова позволяет практически всегда получать положительное решение при значении параметра регуляризации: $\alpha = 1.0 \cdot 10^{-7}$. Однако, получаемые результаты вычислений иногда не соответствуют реальным значениям неизвестных.

Решающее значение здесь имеет правильный выбор начального приближения, поскольку даже в случае положительного решения задачи ОФЗ слишком далекие начальные приближения приводят к разным значениям определяемых неизвестных параметров ЭВО.

Таким образом, математические модели снимков в виде классических коллинеарных зависимостей или их производных, а также RPC-модель вида не обеспечивают корректного решения задачи ОФЗ космических изображений вследствие резкого падения обусловленности исходной системы уравнений поправок.

Результатом указанного выше распада локальных связок сканерного снимка является плохая сходимость итерационного процесса при определении ЭВО сцены. Использование в качестве математической модели космических изображений сканерного типа классических коллинеарных зависимостей или их производных приводит к неопределенности решения задачи ОФЗ из-за отсутствия в этих моделях необходимой временной составляющей.

С учетом сформулированных выше теоретических положений общую математическую модель сканерного снимка логично представить совокупностью двух частных моделей.

$$\begin{aligned} 1. & F_{St} (X_S, Y_S, Z_S, \alpha, \omega, \chi) \\ 2. & F_{din} (V_X, V_Y, V_Z, V_\alpha, V_\omega, V_\chi, \Delta t) \end{aligned} \quad (11)$$

Первая из них - статическая модель, которая описывает стандартную центральную проекцию общей виртуальной связки проектирующих лучей снимка, вторая - корректирующая ее динамическая модель – дополняет статическую модель путем описания конкретного для каждой строки множества локальных связок и отражает динамику формирования каждой локальной связки относительно общей виртуальной связки сцены.

Уравнения связи для статической модели имеют стандартный вид. Выражения для динамической составляющей получим с учетом условия формирования сцены за общее время ΔT пролета спутника активного отрезка Δs орбиты.

Итак, пусть спутник движется по орбите со скоростью V . Тогда разница в пространственном и угловом положении спутника для текущей точки i снимка и всей его сцены определяется в топоцентрической системе координат $OXYZ$ следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta X_{Si} &= \int_{t_0}^{t_i} V_X dt; & \Delta Y_{Si} &= \int_{t_0}^{t_i} V_Y dt; & \Delta Z_{Si} &= \int_{t_0}^{t_i} V_Z dt; \\ \Delta \alpha_i &= \int_{t_0}^{t_i} V_\alpha dt; & \Delta \omega_i &= \int_{t_0}^{t_i} V_\omega dt; & \Delta \chi_i &= \int_{t_0}^{t_i} V_\chi dt, \end{aligned} \quad (12)$$

Если принять, что за время экспозиции сцены скорость движения спутника не изменяется: т.е. $V_i = \text{const}$, то по правилам дифференциального исчисления получим искомые выражения:

$$\begin{aligned} \Delta X_{Si} &= V_X \Delta t_i; & \Delta Y_{Si} &= V_Y \Delta t_i; & \Delta Z_{Si} &= V_Z \Delta t_i; \\ \Delta \alpha_i &= V_\alpha \Delta t_i; & \Delta \omega_i &= V_\omega \Delta t_i; & \Delta \chi_i &= V_\chi \Delta t_i. \end{aligned} \quad (13)$$

Постоянные V_x, V_y, V_z являются проекциями вектора скорости V движения спутника на оси координат топоцентрической системы. Постоянные $V_\alpha, V_\omega, V_\chi$ отражают суммарное влияние суточного вращения

Земли, а также спутника по трем степеням свободы. Переменная Δt_i соответствует разнице во времени формирования текущей точки и центральной точки снимка. Комбинации 7 указанных параметров образуют шесть динамических ЭВО снимка: X_s° , Y_s° , Z_s° , α° , ω° , χ° , которые изменяются в функции от времени.

С учетом сказанного искомая строгая математическая модель динамического типа для сканерного снимка принимает вид:

$$X = X_s + X_s^\circ + (Z - Z_s - Z_s^\circ) \bar{X}' / \bar{Z}'; \quad Y = Y_s + Y_s^\circ + (Z - Z_s - Z_s^\circ) \bar{Y}' / \bar{Z}';$$

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \Pi * \Pi^0 * \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{pmatrix} \quad (14)$$

Основная постоянная матрица Π общего поворота кадрового снимка и корректирующая ее переменная динамическая матрица Π^0 включают по девять направляющих косинусов:

$$\Pi = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}, \quad \Pi^0 = \begin{pmatrix} a_1^0 & a_2^0 & a_3^0 \\ b_1^0 & b_2^0 & b_3^0 \\ c_1^0 & c_2^0 & c_3^0 \end{pmatrix}, \quad \Pi * \Pi^0 = \mathbf{\Pi}. \quad (15)$$

Матричные произведения направляющих косинусов a_i, b_i, c_i и $a_i^\circ, b_i^\circ, c_i^\circ$ математической модели сканерного снимка определяют обобщенные направляющие косинусы $\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i$:

Пространственные фотограмметрические координаты $\bar{X}', \bar{Y}', \bar{Z}'$ выражаются через его обобщенные направляющие косинусы $\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i$ и измеренные координаты x_i, y_i :

$$\begin{aligned} \bar{X}' &= \bar{a}_1 (x - x_0) + \bar{a}_2 (y - y_0) - \bar{a}_3 f; \\ \bar{Y}' &= \bar{b}_1 (x - x_0) + \bar{b}_2 (y - y_0) - \bar{b}_3 f; \\ \bar{Z}' &= \bar{c}_1 (x - x_0) + \bar{c}_2 (y - y_0) - \bar{c}_3 f. \end{aligned} \quad (16)$$

Динамические параметры модели сканерного снимка выражаются через текущее значение времени Δt_i и соответствующие проекции скорости V_i спутника:

$$X_s^\circ = V_x * \Delta t_i; \quad Y_s^\circ = V_y * \Delta t_i; \quad Z_s^\circ = V_z * \Delta t_i; \quad (17)$$

$$\alpha^{\circ} = V_{\alpha} * \Delta\tau_i ; \quad \omega^{\circ} = V_{\omega} * \Delta\tau_i ; \quad \chi^{\circ} = V_{\chi} * \Delta\tau_i . \quad (18)$$

Очевидно, что при $\Delta\tau_i = 0$ выражения (14) ÷ (18) вырождаются в коллинеарные зависимости центральной проекции стандартного вида. Поэтому в соответствии со спецификой данной математической модели полное решение обратной фотограмметрической засечки производится в два этапа. На первом этапе предполагается, что ориентируемый сканерный снимок является кадровым. Это достигается путем принятия условия:

$$\Delta\tau_i = 0 . \quad (19)$$

В результате такого решения ОФЗ определяются приближенные значения ЭВО кадрового снимка, которые принимаются в качестве начального приближения для второго этапа. Знание этих приближенных значений обеспечивает попадание в область сходимости решения задачи ОФЗ. На втором этапе осуществляется полное решение задачи ОФЗ методом итераций с целью определения всех 12 неизвестных. Решению подлежит переопределенная система уравнений поправок, которая составляется на основе измерений на снимке пиксельных координат опорных точек. При этом каждая точка позволяет составить два уравнения поправок. Описанные зависимости были положены в основу программного обеспечения систем Ortho/Neva.

В третьей главе «Экспериментальные исследования процесса обработки спутниковых изображений с помощью цифровой системы «ORTHO/NEVA» приведены результаты обработки космических снимков, снятых оптико-электронными сканирующими системами в синхронном (Alos) и асинхронном (QuickBird) режимах съемки.

Результаты выполненных экспериментальных исследований позволили сделать следующие выводы:

-при внешнем ориентировании космических снимков сканерного типа на основе известных коллинеарных зависимостей, описывающих их геометрию как центральную проекцию, решение ОФЗ всегда приводит к пониженной точности: порядка **5 – 100 pxl** в масштабе обрабатываемого снимка. При этом итеративный вычислительный процесс имеет очень длительную сходимость вследствие плохой обусловленности исходной системы уравнений поправок.

-использование разработанной математической модели снимка динамического типа позволяет выполнять решение ОФЗ с предельной точностью: порядка **0.5-1 pxl** в масштабе обрабатываемого снимка. Причем максимальный эффект достигается при внешнем ориентировании космических снимков сканерного типа, полученных при асинхронном режиме съемки. В этом случае, точность решения ОФЗ возрастает в десятки раз.

Это хорошо согласуется с теоретическими положениями работы в которой установлено, что динамические искажения космических снимков сканерного типа при синхронном режиме значительно меньше, чем при асинхронном.

В заключении приведены основные результаты работы:

1.Выполнен анализ метрических свойств современных космических изображений, в которых выделены две тесно связанные между собой их точностные категории: измерительные возможности и реальные измерительные свойства. Определен теоретический предел точности идентификации объектов местности для космических изображений GeoEye, WorldView-1, QuickBird, IKONOS, OrbView-3, SPOT-5, Alos, который равен: $\sigma_{идент.} = 0.5pxl$. Предвычислен уровень точности создаваемой на их основе картографической продукции. Сделан вывод, что современные космические снимки позволяют создавать ортоизображения в масштабе 1:2000 и мельче, а также цифровой модели рельефа в масштабе 1:5000 и мельче.

2.Получены формулы взаимосвязи существующих видов погрешностей измерений цифровых изображений, позволяющие априорно оценивать степень совершенства принятой на производстве технологии обработки цифровых изображений, уровень точностных характеристик используемых цифровых изображений и измерительных возможностей человека-оператора.

3.Разработаны основные требования к фотограмметрическому обеспечению ЦФС, предназначенной для обработки космических снимков, полученных оптико-электронными сканирующими системами.

4.Обоснованы модульная структура, основные функциональные возможности и технические характеристики первой базовой версии ЦФС.

Определена стратегия эволюционного развития ЦФС, которая определила технический облик ее возможных модификаций при движении к идеальной модели.

5. Установлена и исследована закономерность, проявляющаяся в том, что использование коллинеарных зависимостей центральной проекции для внешнего ориентирования космического снимка сканерного типа всегда приводит к неопределенности решения задачи ОФЗ. Определена основная причина ее возникновения, которая заключается в распаде общей связки гомологий строк кадра снимка вследствие движения спутника на множество локальных связок, привязанных по времени к своим точкам вдоль активного отрезка Δs орбиты, в пределах которого формируется кадр. Доказано, что для строгого внешнего ориентирования сканерного снимка должна использоваться математическая модель динамического типа, уравнения связи которой содержат временную составляющую t .

6. Выполненные исследования показывают, что применение RPC-полиномов всегда приводит к возникновению в конечном продукте существенных ошибок систематического характера из-за несоответствия геометрии снимка закону действия RPC-полиномов. Для устранения этих ошибок требуется иметь дополнительный набор из 5-10 опорных точек, с помощью которых можно повысить точность до уровня 5-8 μm в масштабе снимка. В этой связи предложено использовать RPC-полиномы для организации быстрого поиска опорных точек при внешнем ориентировании космического снимка сканерного типа.

7. Разработана и исследована математическая модель сканерного снимка динамического типа, которая содержит временную составляющую t и с математической точки зрения является более общей по отношению к классической модели кадрового снимка.

8. Разработана двухэтапная вычислительная схема решения задачи ОФЗ, которая для обеспечения попадания в область сходимости предусматривает получение начального приближения, близкого к конечному результату.

Установлено оптимальное значение параметра регуляризации при решении ОФЗ: $\alpha = 1 \cdot 10^{-8}$ для спутниковых изображений сканерного типа.

9. Предложенная в работе математическая модель сканерного снимка позволяет производить фотограмметрическую обработку сканерных снимков высокого разрешения с точностью 0.5-1.0 pxl. Данная модель применима для обработки спутниковых изображений любых типов, получаемых как в синхронном, так и в асинхронном режимах съемки.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:

1. Погорелов В.В., Шавук В.С. Создание локального Datum'a на территорию картографического проекта. М., «Геодезия и картография», № 7, 2007.

2. Погорелов В.В., Шавук В.С. Теоретическое обоснование способа измерения высот зданий по одиночному спутниковому изображению. М., «Геодезия и картография», № 4, 2008.

3. Погорелов В.В., Шавук В.С. Анализ математических моделей при фотограмметрической обработке космических снимков. М., «Геодезия и картография», № 3, 2009.

4. Погорелов В.В., Шавук В.С. Использование спутниковой навигации транспортных средств для различных потребителей. Международный транспортный форум "Транспорт России - 2007". Сочи, 2007.

5. Чекалин В.Ф., Семенов А.А., Аксенов А.Л., Погорелов В.В., Шавук В.С., Воробьев Ю.Д. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 200 661 2680 от 28 июля 2006г. Система «Ortho/Neva», v. 1.0.