

На правах рукописи

НЕКРАСОВ Виктор Владимирович

**Разработка технологии использования снимков высокого  
пространственного разрешения при построении цифровой модели  
рельефа по материалам космических съемок**

Специальность 25.00.34

«Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия»

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**Москва –2008**

Работа выполнена в Московском Государственном Университете Геодезии и Картографии (МИИГАиК) на кафедре Вычислительной техники и автоматизированной обработки аэрокосмической информации.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Журкин Игорь Георгиевич

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор Воронков Владимир Николаевич;

к.т.н. Гречищев Александр Владимирович.

Ведущая организация: Федеральное Государственное Унитарное  
Предприятие УРПЦГ «Уралгеоинформ», г. Екатеринбург.

Защита состоится "21" февраля 2008 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д212.143.01 в Московском Государственном Университете Геодезии и Картографии по адресу:

105064, Москва, К-64, Гороховский пер. 4, МИИГАиК, ауд. 101, корп.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского Государственного Университета Геодезии и Картографии.

Автореферат разослан "18" января 2008 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Краснопевцев Б.В.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность проблемы**

В настоящее время при моделировании местности, выполнении картографических работ, в различных геоинформационных приложениях широко используются цифровые модели рельефа (ЦМР). Для получения ЦМР на большие территории наиболее эффективным решением является обработка космических снимков. Объектом данного исследования является технология использования снимков высокого пространственного разрешения при построении ЦМР по материалам космических съемок на примере обработки данных космической системы «Комета».

Актуальность постановки и решения научно-технической проблемы подтверждается следующими факторами:

1. Отсутствием на настоящий момент эффективной и производительной технологии построения ЦМР с использованием совместной обработки космических снимков различного пространственного разрешения.
2. Наличием большого архива космических снимков, в том числе и снимков системы «Комета», который может быть использован для построения ЦМР.
3. Совершенствованием методов и средств, в том числе технических, построения цифровых моделей рельефа.
4. Наличием большого спроса на цифровые модели рельефа для целей картографии, связи, экологии, ГИС-приложений.

### **Цель и основные задачи исследования**

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование компьютерной технологии, позволяющей эффективно создавать ЦМР на большие территории при совместной обработке космических снимков различного пространственного разрешения на примере данных системы «Комета».

Для достижения цели исследования решались следующие задачи:

1. Исследование искажений снимков, построение эффективных процедур автоматизации процесса внутреннего ориентирования.

2. Разработка методик и алгоритмов внешнего ориентирования стереомодели, обеспечивающих повышение точности внешнего ориентирования путем совместной обработки снимков разного разрешения.

3. Разработка алгоритмов поиска одноименных точек на снимках стереопары, позволяющих увеличить скорость обработки данных большого объема. Для эффективной обработки больших объемов данных оценка времени работы алгоритма (верхняя оценка) не должна превышать  $O(n^2)$ . Алгоритмы поиска одноименных точек должны обеспечивать субпиксельную точность отождествления и критерии для определения успешности отождествления.

4. Разработка методов получения регулярной ЦМР по нерегулярному набору точек.

#### **Научная новизна работы**

- Разработаны метод и алгоритм повышения точности внешнего ориентирования на основе использования совместной обработки снимков различного разрешения, отличающиеся от существующих большей точностью.
- Разработана геометрическая модель панорамного снимка, используемая в алгоритме повышения точности внешнего ориентирования, и при ортотрансформировании снимков с панорамной и сканерной геометрией, отличающаяся от существующих простотой реализации без потери точности модели.
- Разработан новый алгоритм триангуляции нерегулярной сети высотных точек на основе выпуклых оболочек, отличающийся от существующих большей устойчивостью за счет учета особенностей исходных данных, получаемых в процессе стереотождествления.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методы и алгоритмы повышения точности внешнего ориентирования с использованием совместной обработки снимков различного разрешения.
2. Геометрическая модель панорамного снимка, используемая в алгоритме повышения точности внешнего ориентирования и при ортотрансформировании снимков с панорамной и сканерной геометрией.
3. Критерии синтеза алгоритма поиска одноименных точек и алгоритм, синтезированный по данным критериям.
4. Разработанный алгоритм триангуляции нерегулярной сети высотных точек.
5. Разработанный алгоритм регуляризации нерегулярной сети высотных точек.
6. Доказана высокая эффективность совместного использования снимков с различной геометрией и пространственным разрешением при выполнении фотограмметрических работ.

### **Вклад автора в проведенное исследование**

Автором разработаны все алгоритмы и методы, выносимые на защиту и разработан программный пакет, реализующий технологию использования снимков высокого пространственного разрешения при построении цифровой модели рельефа по материалам космических съемок включающий перечисленные алгоритмы.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработана программа геометрической привязки космических снимков «Комета», использующая алгоритм повышения точности внешнего ориентирования.
2. Разработана программная реализация модели панорамного снимка, позволяющая использовать ее как в процедуре повышения точности внешнего ориентирования стереомодели, так и для ортотрансформирования одиночных снимков.

3. Разработана программная реализация алгоритма поиска одноименных точек.
4. Разработана программа построения нерегулярной сети высотных точек, входящая в состав программного пакета для получения ЦМР по снимкам ТК-350.
5. Разработана программа регуляризации нерегулярной сети высотных точек.
6. Доказана высокая эффективность совместного использования снимков с различной геометрией и пространственным разрешением при выполнении фотограмметрических работ.

#### **Апробация работы и публикации по теме**

Основные положения и результаты диссертационной работы **докладывались** на:

4-ой Международной конференции «Методы дистанционного зондирования и ГИС-технологии для контроля и диагностики состояния окружающей среды». МИИГАиК, Москва, 21-23 декабря 1998 г;

4-ой научно-практической конференции «Современные проблемы фотограмметрии и дистанционного зондирования». Москва, 28-29 октября 2003 г.

Третьей учебно-практической конференции "Проблемы ввода и обновления пространственной информации" Москва, 23-27 февраля 1998 г.;

Научно-технической конференции “Russian Concept and Technology of Satellite Remote Sensing and Cartography” г. Сеул, Южная Корея, 3 марта 2001г;

Международном симпозиуме ISPRS «International Symposium on Resource and Environmental Monitoring» г. Хайдарабад, Индия, 3-6 декабря 2002г.

Материалы диссертационных исследований **опубликованы** в 6 статьях в периодических научных изданиях, 3 публикациях в виде тезисов докладов.

Отдельные результаты теоретических и экспериментальных исследований

отражены в отчетах по научно-исследовательским работам и материалах опытно-конструкторских работ.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 213 наименований и одном приложении. Общий объем работы составляет 174 страниц машинописного текста, 62 рисунка, 37 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируется цель, поставлены задачи и описаны граничные условия для разработки алгоритмов обработки. Кратко рассмотрен круг вопросов, рассматриваемых в данной диссертационной работе. Далее, в каждой главе диссертации рассматривается одна из задач исследования, делается обзор публикаций по рассматриваемой теме, производится обоснование выбора метода решения задачи, подробно рассматриваются разработанные методы и алгоритмы, и в заключении кратко перечисляются основные результаты главы. Все разработанные методы проиллюстрированы на примерах обработки реальных космических изображений.

**В первой главе** "Анализ космических съемочных систем, предназначенных для получения геопространственных данных" рассмотрены наиболее известные космические системы дистанционного зондирования Земли, произведено сравнение их характеристик, обоснован выбор данных космической системы «Комета» как информационной основы для разработки технологии построения ЦМР при совместной обработке космических снимков различного пространственного разрешения.

Для рассмотренных систем сравнение производилось по геометрии сенсора, разрешению снимков, покрытию единичным снимком,

геометрическому качеству (отношение базиса стереопары к высоте фотографирования В/Н).

Топографическая камера ТК-350 и панорамная камера высокого разрешения КВР-1000, вместе с датчиками для определения элементов внешнего ориентирования снимков в полете, образуют космическую картографическую систему «Комета», предназначенную для создания топографических и цифровых карт. Камера ТК-350 позволяет получать высокоточные стереопары с геометрией центральной проекции, пригодные для создания моделей рельефа, а фотокамера КВР-1000 предназначена для получения снимков высокого разрешения, необходимых для дешифрирования объектов местности.

При высоте съёмки 220 км панорамная камера КВР-1000 обеспечивает разрешение на местности 2м, ширину кадра 40 км и полосу захвата 160 км. Таким образом, площадь, покрываемую одним кадром ТК-350 (200х300 км), покрывают 7 кадров КВР-1000 при совместном включении обеих камер.

Рассмотренные особенности системы «Комета» позволяют использовать данные этой космической системы для отработки эффективной технологии использования снимков высокого пространственного разрешения при построении цифровой модели рельефа по материалам космических съёмок.

**Во второй главе** "Разработка технологической схемы процесса создания ЦМР и ее обоснование" поставлена задача на основе обобщенной блок-схемы процесса создания ЦМР выделить блоки обработки, специфические для решения задачи построения ЦМР высокой точности и разработать методы и алгоритмы обработки данных, позволяющие учесть особенности исходных данных для создания ЦМР с максимальной точностью. На основе анализа совокупности данных выделены следующие блоки, максимально влияющие на точность и производительность обработки данных в процессе создания ЦМР:

1. блок ориентирования;



2. блок автоматической корреляции;
3. блок построения и регуляризации ЦМР.

В главе 2 рассмотрены результаты разработки блоков 1-2. Разработка блока построения и регуляризации ЦМР рассмотрена в главе 3.

### **Блок ориентирования**

Процедура взаимного ориентирования для стереопары, составленной из снимков, имеющих область перекрытия, но взятых с разных запусков КА доработана с учетом того, что параметры камеры для левого и правого снимков стереопары могут различаться. Для учета данного факта алгоритм взаимного ориентирования доработан для использования снимков камер с различными параметрами внутреннего ориентирования.

### **Методика повышения точности внешнего ориентирования**

Для получения максимальной точности внешнего ориентирования стереомодели совместно используются снимки различного разрешения. Таким образом точность ЦМР определяется точностью опорных точек и разрешением снимка (для камеры ТК-350 10-12 м). Использование методов субпиксельной корреляции позволяет получить точность вычисления высот ЦМР (свободная модель) - до 0.5-5 м. Таким образом, главным ограничением точности ЦМР является точность опорных точек. В настоящее время источником наиболее точной опорной информации являются GPS точки - их точность может достигать 0,01-1 м при использовании дифференциальных методов измерения. Однако использовать GPS-точки для непосредственного ориентирования снимков среднего разрешения без потери точности невозможно, так как точность опознавания GPS-точки, например, на снимке ТК-350, обладающего разрешением на местности 10-12 метров, не может быть существенно выше тех же самых 10-12 метров.

Для повышения точности внешнего ориентирования предлагается следующая методика. На первом этапе GPS-точки опознаются на снимке высокого разрешения, далее точка переносится на стереопару из снимков

среднего разрешения и производится внешнее ориентирование и построение ЦМР по стереопаре. В качестве снимков высокого разрешения могут быть использованы снимки КВР-1000 с характерным разрешением 2 метра на местности, снимки КА Ikonos с разрешением 1 метр, КА QuickBird с разрешением до 0.6 метра.

Перенос опорных точек со снимка высокого разрешения на снимки среднего разрешения осуществляется с помощью разработанной панорамной модели снимка, учитывающей высоты местности (что не позволяют сделать методы, использующие полиномиальные зависимости) и таким образом значительно улучшить точность переноса точек со снимка высокого разрешения на снимок среднего разрешения

По стереопаре строится свободная модель местности. В полученной свободной системе координат производится внешнее ориентирование снимка высокого разрешения, для используемой модели панорамного снимка находится не менее 7 одноименных точек - на левом, правом снимках стереопары и та же точка на снимке высокого разрешения (для используемой модели панорамного снимка необходимо не менее 7 точек).

Соответственно для опорной точки  $i$ , опознанной на снимке высокого разрешения можно вычислить ее координаты в свободной системе координат стереомодели -  $X_i, Y_i$ . Для этого строится локальная ЦМР (в окрестности опорной точки) и ищется точка пересечения луча, проходящего через опорную точку на снимке и поверхности, образованной локальной ЦМР. Все три координаты опорной точки находятся либо прямым вычислением, либо итеративным путем. Определив координаты  $X_i, Y_i, Z_i$  в свободной системе координат по элементам взаимного ориентирования стереопары легко восстанавливаем положение опорной точки на снимках стереопары. Полученные координаты опорных точек используются в процессе внешнего ориентирования.

Решение проблемы повышения точности внешнего ориентирования стереомодели, построенной по снимкам ТК-350 обеспечивается заменой прямого внешнего ориентирования стереомодели по опорным точкам на два этапа - взаимное ориентирование снимков стереомодели и внешнее ориентирование снимка высокого разрешения в свободной системе координат. На практике установлено, что точность взаимного ориентирования значительно выше точности внешнего ориентирования и остаточный вертикальный параллакс может составлять 0.01 пиксела, то есть при размере пиксела, соответствующего 10 метрам на местности точность ориентирования составит 0.1 метра. Для внешнего ориентирования снимка высокого разрешения точность может составить 0.5-1.5 пиксела, что для снимков КВР-1000 разрешения 2 метра на местности составит 1-3 метра, а для снимков Ikonos с разрешением 1 метр, соответственно 0.5-1.5 метра.

### **Геометрическая модель панорамного снимка**

Геометрическая модель панорамного снимка позволяет учитывать смещение точки фотографирования, изменение углов ориентирования камеры в процессе съемки и выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} x-x_0 &= -f \frac{X^*}{Z^*} \\ y-y_0 &= -f \frac{Y^*}{Z^*} \end{aligned} ,$$

где

$x, y$  - координаты на снимке,

$x_0, y_0$  - координаты главной точки фотоснимка,

$$X^* = a_1(X - (X_{s1} + V_x^*(AX + BY))) + b_1(Y - (Y_{s1} + V_y^*(AX + BY))) + c_1(Z - (Z_{s1} + V_z^*(AX + BY)))$$

$$Y^* = a_2(X - (X_{s1} + V_x^*(AX + BY))) + b_2(Y - (Y_{s1} + V_y^*(AX + BY))) + c_2(Z - (Z_{s1} + V_z^*(AX + BY)))$$

$$Z^* = a_3(X - (X_{s1} + V_x^*(AX + BY))) + b_3(Y - (Y_{s1} + V_y^*(AX + BY))) + c_3(Z - (Z_{s1} + V_z^*(AX + BY)))$$

$$A = \cos(\varphi) \quad B = -\sin(\varphi),$$

$\varphi$  - поворот оси  $X'$  относительно исходной системы координат  $XY$

$X, Y, Z$  - координаты на местности,

$X_s, Y_s, Z_s$  - координаты точки фотографирования,

$$a_1 = \cos(\alpha') \cdot \cos(\kappa') - \sin(\alpha') \cdot \sin(\omega') \cdot \sin(\kappa') \quad a_2 = -\cos(\alpha') \cdot \sin(\kappa') - \sin(\alpha') \cdot \sin(\omega') \cdot \cos(\kappa')$$

$$a_3 = -\sin(\alpha') \cdot \cos(\omega')$$

$$b_1 = \cos(\omega') \cdot \sin(\kappa') \quad b_2 = \cos(\omega') \cdot \cos(\kappa') \quad b_3 = -\sin(\omega')$$

$$c_1 = \sin(\alpha') \cdot \cos(\kappa') + \cos(\alpha') \cdot \sin(\omega') \cdot \sin(\kappa') \quad c_2 = -\sin(\alpha') \cdot \sin(\kappa') + \cos(\alpha') \cdot \sin(\omega') \cdot \cos(\kappa')$$

$$c_3 = \cos(\alpha') \cdot \cos(\omega'),$$

$$\alpha' = \alpha + V_\alpha (AX + BY) \quad \omega' = \omega + V_\omega (AX + BY) \quad \kappa' = \kappa + V_\kappa (AX + BY),$$

Для определения параметров ориентирования по опорным точкам необходимо представить систему нелинейных уравнений в линейном виде относительно определяемых переменных  $[ X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega, \kappa, V_x, V_y, V_z, V_\alpha, V_\omega, V_\kappa, A, B ]$ . Система уравнений решается методом наименьших квадратов. Результаты исследования данной модели приведены в главе 4.

### **Блок автоматической корреляции**

Задача поиска идентичных точек на изображениях, составляющих стереопару имеет большое практическое значение для использования в системе построения ЦМР по космическим снимкам. Космические снимки обладают рядом особенностей: большой размер, невысокое значение отношения сигнал/шум. Размерность задачи накладывает особые требования на вычислительную сложность алгоритма. Для процедуры автоматической корреляции были сформулированы критерии синтеза алгоритма поиска одноименных точек снимка, позволяющие минимизировать вычислительную сложность. К ним относятся:

- Минимальная сложность функции, задающей меру близости двух изображений;
- Объем перебора при поиске наилучшего соответствия двух изображений;
- Стратегия поиска (полный перебор -  $O(M^2N^2)$ , пирамидальные слои,

градиентный поиск в среднем  $O(M^2N)$ , где  $N \times N$  – размеры изображения,  $M \times M$  – размеры области поиска.

В соответствии с этими критериями был разработан алгоритм поиска одноименных точек.

В качестве стандартных мер близости двух областей изображений размера  $R$ , заданных функциями  $F(p+h)$  и  $G(p)$  соответственно, где  $h$ -вектор смещения,  $p$ -вектор положения, используют различные нормы:

норма  $L_1 = \sum_{p \in R} |F(p+h) - G(p)|$

норма  $L_2 = (\sum_{p \in R} [F(p+h) - G(p)]^2)^{1/2}$

нормализованная кросс-корреляция

$$K = \frac{\sum_{x \in R} F(x+h) * G(p)}{(\sum_{p \in R} F(p+h)^2)^{1/2} (\sum_{p \in R} G(p)^2)^{1/2}}$$

Минимальной вычислительной сложностью обладает норма  $L_1$ .

Для минимизации объема перебора при поиске решения предложено использовать последовательный алгоритм оценки близости - sequential similarity detection algorithm (SSDA), который только оценивает ошибку для каждого вектора диспаратности. Для оценки найденного решения используется функция нормализованной кросс-корреляции, позволяющая по значению коэффициента корреляции судить о достоверности решения. При этом значение функции вычисляется только для небольшого окна оценки, что уменьшает вычислительные затраты. В зависимости от размеров окна оценки вычисляется пороговый коэффициент корреляции.

Для данной задачи требуется субпиксельная точность отождествления одноименных точек. Рассмотрены три способа субпиксельного уточнения: аппроксимация параболоидом, адаптивная субпиксельная кросс-корреляция (adaptive subpixel cross-correlation), адаптивная корреляция методом наименьших квадратов (adaptive least squares correlation). В синтезированном алгоритме используется аппроксимация параболоидом, обладающая по

сравнению с остальными методами наименьшей вычислительной сложностью и точностью порядка  $1/8$  пиксела.

Для разрабатываемой технологии построения ЦМР синтезированный алгоритм позволяет получить следующие результаты:

1. Использование последовательного алгоритма оценки близости значительно увеличивает скорость обработки (до 10 раз по сравнению с рассмотренными методами), однако приводит к увеличению числа ошибочных определений.
2. Использование функции оценки позволяет отбрасывать ошибочные определения.
3. Метод субпиксельного уточнения найденного решения позволяет получить точность порядка  $1/8$  пиксела.
4. Введение геометрических ограничений значительно уменьшает область поиска.

**В третьей главе** "Разработка метода и алгоритма построения ЦМР по космическим снимкам" поставлена задача по нерегулярному набору точек получить регулярную сетку точек и обеспечить достаточную гладкость полученной ЦМР. Для решения этой задачи рассмотрены существующие алгоритмы интерполяции и триангуляции. Разработан алгоритм триангуляции набора нерегулярно расположенных точек на основе выпуклых оболочек, алгоритм обладает большей устойчивостью, чем рассмотренные алгоритмы. Алгоритм предполагает построение списка вложенных выпуклых оболочек для набора входных точек и последующую триангуляцию двух соседних выпуклых оболочек.

При построении ЦМР по данным космических съемок (как и аэрофотосъемки) можно учесть особенности получения и представления исходных данных для алгоритма триангуляции (рис. 1).

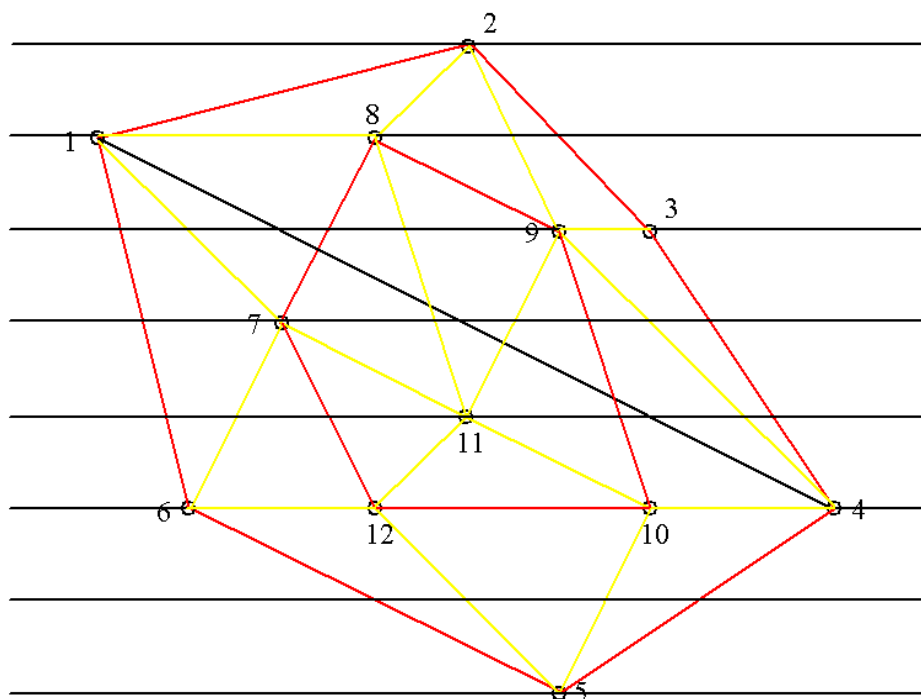


Рис. 1. Построение выпуклых оболочек и триангуляция замкнутого полигона с учетом структуры данных

Информация о высотах точек местности получается в результате корреляции взаимных точек на эпполярной (развернутой вдоль базиса) стереопаре, в результате полученные точки образуют почти правильную регулярную сетку с пропусками точек из-за невозможности их отождествления примененным алгоритмом корреляции. Для представления таких данных (с учетом их дальнейшей обработки) удобно использовать списки точек по строкам.

Запись алгоритма на псевдокоде представлена на рисунке 2.

В реальных фотограмметрических и картографических цифровых системах, где организация исходных данных приближается к регулярной сетке точек высотных отметок, наиболее целесообразным представляется использование улучшенного алгоритма триангуляции с помощью выпуклых оболочек с общей оценкой  $O(n \cdot \log(n))$  по наибольшей оценке первого шага, где  $n$  - число точек

**Начало алгоритма**

//Шаг 1

**Цикл** пока входной список точек не пуст    Выбрать самую левую точку  $s$  в первой строке    Исключить  $s$  из списка точек строки    Выбрать при обходе по ходу часовой стрелки крайнюю точку  $s_1$  другой строки    Исключить  $s_1$  из списка точек строки

Создать ребро оболочки

**Цикл** по всем крайним точкам всех строк        **Если** крайняя точка строки  $s[i]$  левее ребра, **То**

Удалить текущее ребро

            Добавить ребро  $e_1$  : начало - точка  $s$ , конец- новая крайняя точка строки            Исключить  $s[i]$  из списка точек строки            Текущее ребро :=  $e_1$         **Иначе**

Текущее ребро := следующее ребро

**Конец Цикла****Конец цикла**

//Шаг 2

**Цикл** по всем выпуклым оболочкам    Образовать замкнутый полигон из оболочки  $_i$  и оболочки  $_i+1$ 

Триангуляция замкнутого полигона

**Конец цикла****Конец алгоритма**

Рис. 2. Алгоритм триангуляции с помощью выпуклых оболочек

**Алгоритм регуляризации нерегулярной сети высотных точек**

Большой объем данных, получаемый по снимкам космических систем, требует использовать максимально быстрые локальные алгоритмы, с минимальной оценкой времени работы.

Были рассмотрены следующие алгоритмы регуляризации:

1. аппроксимация ЦМР набором плоскостей, проходящих через узлы триангуляции;
2. полиномиальная функция, проходящая через вершины текущего треугольника и смежных с ним треугольников;
3. метод взвешенной интерполяции по ближайшему соседу, аналогичный методу интерполяции Гаусса (при  $p=2$  формулы совпадают).



Недостатки:

1. все методы не обеспечивают гладкого перехода на ребре между смежными треугольниками, и ЦМР даже визуально не выглядит гладкой, что во многих случаях неприемлемо
2. для определения коэффициентов полиномиальной функции необходимо решить систему линейных уравнений, что ведет к значительным вычислительным затратам;

Для обеспечения гладкости на ребрах треугольника предложен следующий алгоритм, состоящий из двух шагов:

1. Для ребра треугольника методом взвешенной интерполяция по ближайшему соседу строится гладкая граница. При этом в качестве опорных точек для интерполяции выбираются вершины ребра и вершины треугольников, прилежащих к заданному ребру (обеспечиваются четыре опорные точки). Гладкая граница строится для всех трех ребер заданного треугольника.
2. Для заданной точки текущего треугольника определяются три точки, лежащие на ребрах треугольника, их высоты выбираются из построенной гладкой границы для каждого ребра. Вместе с вершинами текущего треугольника по полученным шести точкам вычисляется высота заданной точки.

Данный алгоритм позволяет построить гладкую поверхность локально, при этом обеспечивается учет смежных локальных поверхностей и общая результирующая поверхность является гладкой и за счет локальности данного алгоритма обеспечивается линейное время работы алгоритма с оценкой  $O(n)$  в худшем случае. Что позволяет использовать его в системе получения ЦМР по космическим снимкам.

**В четвертой главе "Экспериментальные исследования"** приведены результаты экспериментальных исследований методов и алгоритмов,

применение которых обосновано в предыдущих главах и разработанных для решения поставленных задач.

Для процесса внутреннего ориентирования экспериментально исследовались следующие закономерности:

- распределение искажений снимков по разным видам искажений;
- точность процесса внутреннего ориентирования в зависимости от учитываемых искажений.

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены два тестовых примера. Каждый тестовый пример представляет из себя стереопару, составленную из фрагментов снимков ТК-350 размером 16x26см. Размер фрагментов обусловлен используемым сканером (*UltraScan 5000*), размер окна сканирования которого 25.2x24.6см при сканировании с высоким разрешением (полный размер снимка ТК-350 больше окна сканирования). Для тестов использовались снимки на территорию Саудовской Аравии. В первом тесте использовались снимки на район города Aseer полученные 18.10.2000 года (20 запуск). Во втором тесте использовались снимки на район города Jeddah, полученные 29.03.1991 года (13 запуск).

Полный учет искажений снимков позволяет получить следующие точности параметров внутреннего ориентирования:

1. проект Aseer: левый снимок - СКО=2.842 мкм; правый снимок – СКО=3.217 мкм;
2. проект Jeddah: левый снимок - СКО=3.318 мкм; правый снимок - СКО=3.065 мкм.

Результаты экспериментов говорят о возможности получить точность внутреннего ориентирования до 3-4 мкм при учете особенностей камеры ТК-350.

Для использования в процедурах повышения точности разработанной модели панорамного снимка было проведено исследование геометрической точности данной модели для снимков камеры КВР-1000. При исследовании

предельной точности геометрической модели были использованы опорные точки, полученные методом дифференциальной GPS.

Анализ результатов показывает, что для разработанной геометрической модели панорамного снимка максимальное среднеквадратическое отклонение находится в интервале 2.072-3.386 м что эквивалентно 1.036-1.693 пиксела, а минимальное СКО находится в интервале 0.090-0.783 м, что для снимков КВР-1000 с разрешением на местности 2 м эквивалентно 0.045-0.3915 пиксела, что позволяет сделать вывод о хорошей геометрической точности разработанной модели панорамного снимка.

Для использования в процедуре повышения точности снимков высокого разрешения космической системы Ikonos проводилось исследование геометрической точности разработанной модели для этих снимков. Результирующая точность внешнего ориентирования снимков Ikonos составляет 0.492 м (приблизительно 0.5 пиксела) и обусловлена, в основном, ошибками опознания опорных точек при их определении. После ортотрансформирования были измерены ошибки на опорных точках - СКО= 0.476402 м. Для контрольных точек, которые не были использованы при ориентировании снимка результирующая ошибка СКО= 0.551588 м.

Результаты, полученные при исследовании точности геометрической модели панорамного снимка позволяют утверждать, что для повышения точности ориентирования стереопары снимков ТК-350 можно применять как снимки камеры КВР-1000, так и снимки, обладающие другой геометрией, но имеющие лучшее разрешение, например снимки систем Ikonos и QuickBird.

### **Результаты применения процедур повышения точности внешнего ориентирования.**

Для тестовых проектов использовались опорные точки, полученные методом дифференциальной GPS. Точность данных опорных точек не хуже 0.1-0.5 метра. Производилось внешнее ориентирование стереомодели для

данных опорных точек. Использовалась первая методика повышения точности, описанная во второй главе.

Получены следующие результаты для тестового района Aseer (Саудовская Аравия, стереопара 14001.bmp, 14023.bmp):

- точность внешнего ориентирования ( $СКО_{XYZ}$ ): 10.369783 м;
- точность ориентирования в плане ( $СКО_{XY}$ ): 10.7710 м;
- точность ориентирования по высоте ( $СКО_Z$ ): 9.5167 м.

Для снимка высокого разрешения КВР-1000 на район Aseer точность внешнего ориентирования ( $СКО$ ) равна 3.022093 м.

После применения первой методики повышения точности внешнего ориентирования точность ориентирования  $СКО_{xy} = 8.52$  м. В результате применения методики, точность повысилась на 20.8%.

Для тестового района Jeddah (Саудовская Аравия, стереопара 1172.bmp, 1194.bmp) получены следующие результаты:

- точность внешнего ориентирования ( $СКО_{XYZ}$ ): 12.336599 м;
- точность ориентирования в плане ( $СКО_{XY}$ ): 13.7537 м;
- точность ориентирования по высоте ( $СКО_Z$ ): 8.8456 м.

Для снимка высокого разрешения КВР-1000 на район Jeddah точность ориентирования ( $СКО$ ): 4.962 м. После применения методики повышения точности внешнего ориентирования, точность ориентирования ( $СКО_{xy}$ ) составила 10.65 м. В результате применения методики, точность повысилась на 22.5%. Полученные результаты говорят о том, что применение методики повышения точности внешнего ориентирования позволяет получить увеличение точности внешнего ориентирования до 20%, относительно исходной точности ориентирования. Увеличение точности зависит от количества точек, использованных в процессе уточнения по снимку высокого разрешения.

### **Результаты исследований алгоритмов триангуляции**

Были исследованы следующие алгоритмы триангуляции: алгоритм "Divide&Conquer", инкрементный алгоритм, алгоритм "Sweepline" и алгоритм триангуляции с помощью выпуклых оболочек. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование разработанного алгоритма триангуляции с использованием выпуклых оболочек для построения триангуляции в разрабатываемой технологии.

Проведено исследование построения гладкой ЦМР по нерегулярному триангулированному набору точек с помощью различных методов построения регулярной ЦМР, описанных в третьей главе. Сравнение полученных данных говорит о том, что предложенный метод получения гладкой регулярной ЦМР обеспечивает получение результата путем применения локальной процедуры.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Разработана методика и алгоритм внешнего ориентирования стереомодели, обеспечивающий повышение точности внешнего ориентирования путем совместной обработки снимков разного разрешения. На основе разработанного алгоритма повышения точности внешнего ориентирования разработана программа, реализующая данный алгоритм.
2. Разработана модель панорамного снимка, позволяющая использовать ее как в процедуре повышения точности внешнего ориентирования стереомодели, так и для ортотрансформирования одиночных снимков. Дана программная реализация этой модели.
3. Разработан алгоритм и программный модуль поиска одноименных точек на снимках стереопары, позволяющие увеличить скорость обработки данных большого объема на основе алгоритма SSDA. Оценка времени работы алгоритма не превышает  $O(n^2)$ , что позволяет эффективно обрабатывать

данные большого объема. Алгоритм обеспечивает субпиксельную точность отождествления.

4. Разработана эффективная программа построения нерегулярной сети высотных точек на основе алгоритма триангуляции, входящая в состав программного пакета для получения ЦМР по снимкам ТК-350.

5. Разработанные алгоритмы и программы реализованы в виде программных модулей и технологий обработки снимков, полученных космической съемочной системой «Комета».

6. Подтверждена эффективность применения снимков различного разрешения при выполнении фотограмметрических работ с использованием разработанных алгоритмов и программ.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

(по перечню ВАК 3 статьи)

1. Некрасов В.В. Повышение точности внешнего ориентирования стереомодели // Геодезия и картография. - 2001. - №11. - с.32-34
2. Некрасов В.В. Совместное использование снимков различного разрешения для повышения точности внешнего ориентирования стереомодели // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. Московский государственный университет геодезии и картографии. - 2001. - №4. - с.98-102.
3. Журкин И.Г., Некрасов В.В. Алгоритмы получения ЦМР по материалам космических съемок // Геодезия и картография. - 2002. - №7. - с.43-48.
4. Victor V. Nekrasov Ortho/Z-Space Software and it's use for solving of actual tasks of modern Cartography Russian Concept and Technology of Satellite Remote Sensing and Cartography (Пакет программ Ortho/Z-Space и его использование для решения актуальных задач современной картографии) march, 3-9, 2001, Seoul, Korea pp 31-58.
5. Nekrassov Victor V., Chekalin Vladimir F., Moltchachkine Nikolai M. ORTHO/Z-SPACE SOFTWARE: HIGHLY ACCURATE

ORTHORECTIFICATION OF VERY HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGES (Пакет программ Ortho/z-space: высокоточное ортотрансформирование спутниковых снимков очень высокого разрешения) / ISPRS Technical commission VII Symposium on Resource and Environmental Monitoring and ISRS annual Convention. - Hyderabad, India, 2002. - Vol.34. - Part 7. - pp.22-25.

6. Victor V. Nekrassov, Nikolai M. Moltchachkine INCREASING OF ACCURACY OF EXTERIOR ORIENTATION OF TK-350 SATELLITE IMAGES (Увеличение точности внешнего ориентирования космических снимков ТК-350) / ISPRS Technical commission VII Symposium on Resource and Environmental Monitoring and ISRS annual Convention december, 3-6, 2002 Hyderabad, India, 2002. – vol.34. - part 8.- pp. 24-26.

7. Некрасов В.В. Orthospace - новое программное обеспечение для обработки материалов дистанционного зондирования (Тезисы доклада на 4 Международной конференции «Методы дистанционного зондирования и ГИС-технологии для контроля и диагностики состояния окружающей среды» МИИГАиК, г. Москва, 21-23 декабря 1998 г.)

8. Некрасов В.В. Синтез алгоритма стереотождествления для обработки космических изображений // Четвертая научно-практической конференции Современные проблемы фотограмметрии и дистанционного зондирования: Тез. докладов. - М.: 2003. - с.28-29.

9. Чекалин В.Ф., Некрасов В.В., Головин Ю.В. Orthospace 1.1 - новое программное обеспечение для обработки материалов дистанционного зондирования // Третья учебно-практическая конференция Проблемы ввода и обновления пространственной информации: Тез. докладов. - М., 1998. - с. 139-141.