

**ЛАЗАРЕВА ЕВГЕНИЯ ВАДИМОВНА**

**МЕТОДИКА ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
МАРШРУТА СНИМКОВ КОСМИЧЕСКОЙ  
ПАНОРАМНОЙ СЪЁМКИ**

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в ФГБГОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» на кафедре Телекоммуникаций

Научный руководитель: кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Андронов Владимир Германович

Официальные оппоненты: Нехин Сергей Степанович  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных», заведующий отделом аэрокосмосъемки и фотограмметрии

Кадничанский Сергей Алексеевич  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: ОАО «Научно-исследовательский институт точных приборов» (ОАО «НИИ ТП»)

Защита состоится 19 декабря 2013 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.01 при Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва, К-64, Гороховский пер. 4, МИИГАиК, ауд.\_\_\_\_, корп.\_\_\_\_.

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

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Степанченко Алексей Леонидович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В структуре космических снимков высокого (2-10 м) разрешения, обеспечивающих решение многих задач исследования Земли из космоса, особое место занимают архивные космические панорамные изображения KVR-1000, которые при разрешении 2 м в центре снимка обладают уникальной полосой захвата размером до 240 км поперёк трассы КА. При этом протяжённость полосы захвата одиночных снимков, полученных в объектовых режимах съёмки, составляет около 40 км, а в маршрутных режимах соответствует длительности включения съёмочной аппаратуры и может достигать сотни километров. Указанные характеристики космических панорамных снимков остаются уникальными до сих пор и с учётом огромного архивного фонда на всю территорию Земли обеспечивают их востребованность при решении задач создания ЦМР, ортофотопланов и мониторинга обширных территорий, переноса опорных точек на снимки среднего разрешения с большой полосой захвата на местности, создания банков опорных точек для формирования региональной инфраструктуры пространственных данных и т.д. Для решения этих задач по одиночным панорамным снимкам успешно применяются существующие методики их фотограмметрической обработки, которые обеспечивают уточнение элементов внешнего ориентирования (ЭВО) по наземным опорным точкам с последующим определением координат точек земной поверхности по уточнённым значениям ЭВО. Однако, используемые до настоящего времени методики фотограмметрической обработки космических панорамных снимков, имеют ряд недостатков. При необходимости обработки всех одиночных снимков, полученных в режиме маршрутной съёмки, требуется большое число наземных опорных точек, кратное числу обрабатываемых снимков. Так, например, при числе снимков в маршруте съёмки, равном восьми, и числе требующихся опорных точек для каждого одиночного снимка, равном семи, общее число точек планово-высотного обеспечения должно составлять не менее 56. Кроме того, определение координат точек земной поверхности по панорамным снимкам при использовании цифровой модели рельефа (ЦМР) производится методом приближений.

Перечисленные недостатки обуславливают значительную трудоёмкость фотограмметрической обработки материалов маршрутной панорамной съёмки и, как следствие, высокую стоимость этих работ. В этой связи научно-техническая задача, решаемая в работе и заключающаяся в повышении производительности фотограмметрической обработки одиночных снимков маршрута космической панорамной съёмки, является актуальной. Работа выполнена в соответствии с Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.», в рамках НИР «Организация процессов разработки, формирования и актуализации ортогеокодированных данных дистанционного зондирования обширных территорий в интересах

геоинформационного обеспечения социально-экономического развития регионов», государственный контракт № П2216 от 11.11.2009.

**Цель работы:** разработка и исследование методики фотограмметрической обработки маршрута снимков космической панорамной съёмки, обеспечивающей повышение производительности и сокращение количества планово-высотных опорных точек, требуемых для выполнения комплекса фотограмметрических работ.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- анализ существующих методик фотограмметрической обработки космических сканерных изображений, обоснование выбора направлений исследования;

- разработка комплекса моделей, обеспечивающих математическое описание процессов построения и внешнего ориентирования снимков маршрута съёмки в единой маршрутной системе координат;

- разработка методики фотограмметрической обработки одиночных панорамных снимков, полученных в режиме маршрутной съёмки, обеспечивающей сокращение количества планово-высотных опорных точек, требуемых для выполнения комплекса фотограмметрических работ, и временных затрат на выполнение фотограмметрических построений;

- построение аналитической фотограмметрической модели маршрута одиночных панорамных снимков и тестового участка местности и исследование на макетных данных точности разработанной методики их фотограмметрической обработки.

**Объект исследования** - космические панорамные изображения земной поверхности высокого разрешения.

**Предмет исследования** – математические модели съёмки и методики фотограмметрической обработки космических панорамных снимков, получаемых в режимах маршрутной съёмки со сканированием головного зеркала съёмочной аппаратуры.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, теория множеств, теории статистического анализа и математического моделирования, теория космической фотограмметрии, теория небесной механики, астрономия, картография. Для использования в экспериментальных исследованиях ЦМР тестового участка местности применялся пакет ГИС MapInfo 10.1.

**Новыми научными результатами и основными положениями, выносимыми на защиту, являются:**

1. Геометрическая модель космической панорамной съёмки, устанавливающая функциональную связь между порядковыми номерами пикселей оцифрованных одиночных панорамных снимков и геоцентрическими координатами соответствующих им точек местности, отличающаяся математическим описанием построения и внешнего ориентирования снимков в единой маршрутной системе координат, что

позволяет объединить все одиночные снимки в единое панорамное изображение маршрута съёмки.

2. Кинематическая модель движения изображения в фокальной плоскости фотокамеры, устанавливающая в геоцентрической системе координат функциональную связь составляющих скорости движения изображения с элементами внешнего ориентирования и параметрами сканирования головного зеркала, отличающаяся возможностью контроля и учёта параметров смаза при построении единого панорамного изображения маршрута съёмки.

3. Методика фотограмметрической обработки маршрута снимков космической панорамной съёмки, основанная на уточнении параметров съёмки по опорным точкам местности и определении пространственных координат точек земной поверхности по этим уточнённым параметрам съёмки, отличающаяся меньшим составом уточняемых параметров съёмки, сокращением числа требующихся для этого опорных точек и безытерационным определением геоцентрических координат точек местности.

4. Практические рекомендации по составу уточняемых параметров маршрутной панорамной съёмки, выбору оптимального числа и конфигурации опорных точек на одиночных снимках, что позволяет повысить производительность и снизить стоимость фотограмметрических работ.

**Практическая значимость работы.** Практическая значимость полученных результатов исследования определяется тем, что они доведены до программно-алгоритмической реализации и являются методической основой для совершенствования математического и программного обеспечения цифровых фотограмметрических систем в части фотограмметрической обработки космических сканерных изображений.

**Достоверность** научных результатов, полученных в работе, подтверждена использованием современных средств и методик проведения исследований, а также экспериментальными исследованиями на макетных данных.

**Реализация и внедрение.** Основные теоретические и практические результаты работы используются в научно-исследовательской работе Юго-Западного государственного университета, а также в учебном процессе Юго-Западного государственного университета в рамках направления подготовки бакалавров Информационные технологии и системы связи по дисциплине «Основы дистанционного зондирования Земли и космическая фотограмметрия».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: Международной научно-технической конференции «Геодезия, картография и кадастр – XXI век» (Москва, 2009г.); Международной научно-практической конференции «Перспективы развития информационных технологий» (Новосибирск, 2011г.); Всероссийской

научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Молодежь и современные информационные технологии» (Томск, 2011г.); II и III Региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы инфокоммуникаций» (Курск, 2009-2011г.), а также на научно-технических семинарах кафедры «Телекоммуникации» Юго-Западного государственного университета (2009-2013г.).

**Публикации.** Результаты выполненных исследований и разработок отражены в 20 научных работах, из них 9 статей в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий. Получено 5 свидетельств о регистрации электронного ресурса.

**Личный вклад автора.** Все научные результаты получены автором лично. В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателем проведен анализ состояния вопроса в области места и роли данных ДЗЗ в создании инфраструктуры пространственных данных для обеспечения социально-экономической деятельности регионов [15, 18-20, 22], особенностей формирования маршрута одиночных космических панорамных снимков съёмочной аппаратурой со сканирующим головным зеркалом [2, 4, 16, 21], получен ряд формул в модели скорости движения изображений в режимах маршрутной съёмки [5], разработана координатно-временная модель съёмочной аппаратуры, модель определения параметров сканирования и ряд формул в геометрической модели в режиме маршрутной съёмки [1,3, 6-9, 17, 21], ключевые элементы ряда этапов в методиках совместной фотограмметрической обработки одиночных панорамных изображений [23-24], а также программное обеспечение геоорбитального моделирования космической панорамной маршрутной съёмки [10-14, 25].

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и библиографического списка, включающего 151 наименование. Диссертация изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 35 рисунков и 8 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснованы актуальность, объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи работы, показаны её научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** рассмотрено состояние вопроса фотограмметрической обработки космических сканерных изображений. Показано, что существующие методы можно разделить на полиномиальные, фотограмметрические и аппроксимирующие методы. Первая группа методов основана на использовании опорных точек, которые визуально или автоматически опознаются и отождествляются на исходном космическом изображении и на некоем эталоне. Эти методы требовательны к наличию опорных точек на снимке, топологии их расположения по полю изображения и характеризуются высокой трудоемкостью процесса. Методы второй группы базируются на законах построения космических изображений, принятых в фотограмметрии, и потенциально могут быть реализованы в автоматическом

режиме, а их точность определяется точностью исходных данных, строгостью используемых моделей и теоретически соответствует разрешающей способности космических изображений. Третья группа методов использует так называемые коэффициенты рациональных полиномов, которые получают на основе применения методов второй группы. Отмечено, что точность фотограмметрической обработки, основанной на использовании аппроксимирующих методов, ниже, чем потенциальная точность фотограмметрических методов. Кроме этого, первая и третья группы методов не имеют физического смысла и не пригодны для моделирования рассматриваемых процессов. Анализ существующих фотограмметрических методов, выбранных для дальнейших исследований, показал недостаточную проработанность вопросов построения моделей сканерных изображений, получаемых в режимах панорамной съёмки со сканирующим головным зеркалом. Рассмотрены возможные пути решения этих вопросов, обоснована целесообразность введения терминов формат модели изображения (схема построения изображения) «снимок-камера-местность» и «местность-камера-снимок», отражающих направленность вычислительных процессов от координат точек снимка к пространственным координатам местности и наоборот.



Рис.1. Схемы построения изображений

Показано, что первая схема формализует задачу нахождения геоцентрических координаты точек земной поверхности по заданным порядковым номерам пикселей оцифрованного панорамного снимка, в которых в фиксированные моменты времени сформированы изображения этих точек. Она включает в себя два итерационных контура, по геодезической широте и высоте, но малые размеры рабочих областей. Вторая схема относится к задаче нахождения порядковых номеров пикселей оцифрованного панорамного снимка по заданным геоцентрическим координатам точек земной поверхности, попавших в полосу захвата съёмочной аппаратуры, и имеет один итерационный контур по текущему времени съёмки, но большую, чем в первой схеме рабочую область, которая по определению не может быть меньше интервала включения. В соответствие с этим для дальнейших исследований была выбрана первая схема, имеющая меньший на порядок уровень вычислительных затрат и большее число независимых уравнений, что позволяет использовать при организации фотограмметрической обработки изображений меньший объём опорной информации.

**Во второй главе** представлено теоретическое обоснование математического описания процессов построения единого панорамного изображения маршрута съёмки в формате «снимок—камера—местность» (рисунок 2). Рассмотрим полученные результаты более подробно.

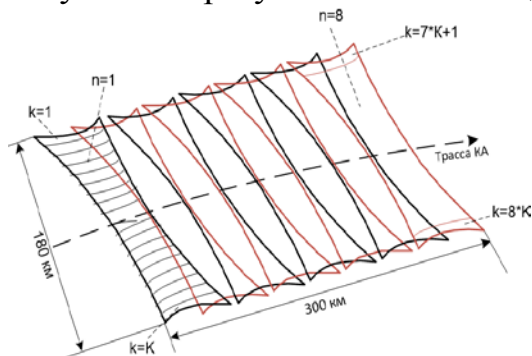


Рис.2. Построение снимков в единой маршрутной системе координат

На основе анализа принципов действия, топологии съёмочной аппаратуры KVR-1000 и специфики её применения в маршрутных режимах съёмки выделены следующие особенности маршрутной панорамной съёмки. Маршрутная панорамная съёмка, как правило, покрывает полосу захвата на местности размером 200 на 300 км. Поэтому маршрут съёмки представляет собой непрерывное включение длительностью порядка сорока секунд и состоящее из восьми одиночных снимков, и что очень важно, имеющих между собой небольшое перекрытие по направлению движения КА. При этом программа работы системы ориентации и стабилизации КА построена таким образом, чтобы обеспечивать на всём интервале съёмки одни и те же близкие к нулю углы тангажа, крена и рыскания КА, а программа сканирования съёмочной аппаратуры - одинаковые для всех восьми снимков начальные и конечные углы панорамирования головного зеркала и постоянную угловую скорость сканирования (рисунок 3).

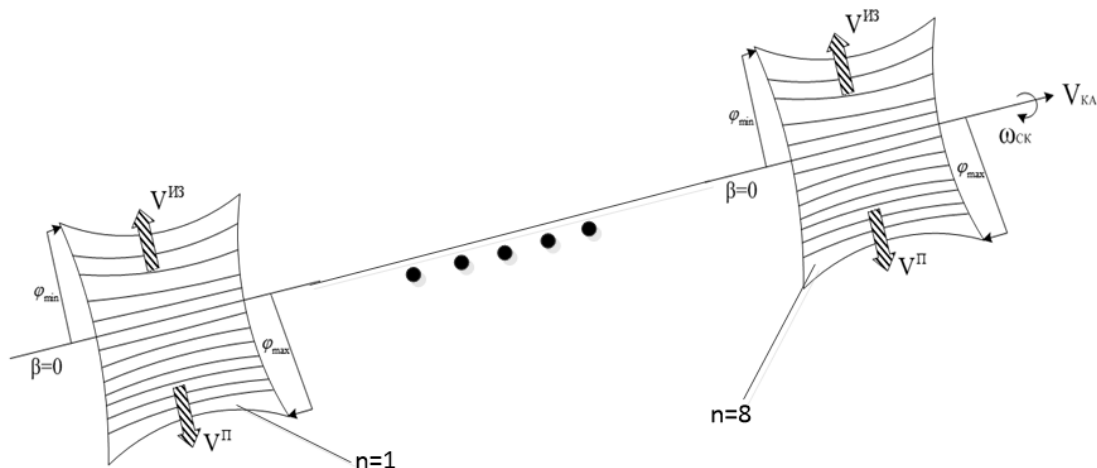


Рис. 3. Геометрия панорамной маршрутной съёмки

Для построения единого панорамного изображения маршрута съёмки в фокальной плоскости (ФП) съёмочной аппаратуры были введены следующие системы координат (рисунок 4).



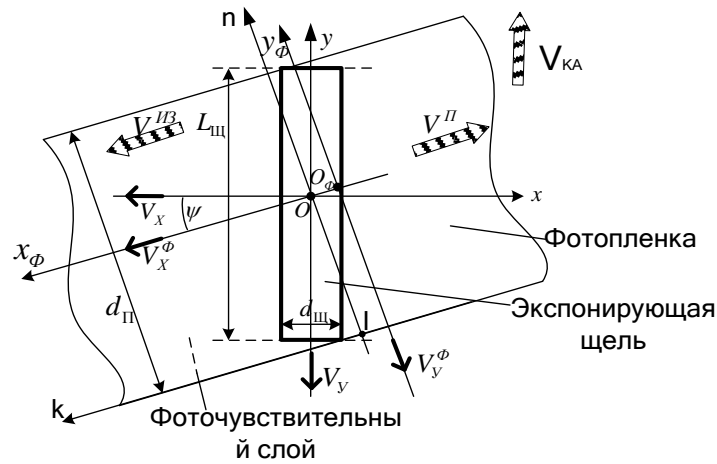


Рис. 4. Топология фокальной плоскости KVR-1000

Начало правой системы координат (точка  $O$ ) камеры  $Oxy$  расположено в геометрическом центре экспонирующей щели (ЭЩ) и совпадает с главной точкой ФП, ось  $Oy$  направлена в сторону движения КА параллельно краям ЭЩ, а ось  $Ox$  дополняет систему до правой. Начало единой маршрутной левой системы координат фотоплёнки  $O_{\phi x_{\phi} y_{\phi}}$  находится в середине переднего края рулона фотоплёнки и перемещается вместе с ним со скоростью  $V^{\text{II}}$  протяжки плёнки под углом  $\psi$  к оси  $Ox$ . Ось  $O_{\phi x_{\phi}}$  направлена параллельно верхним и нижним краям фотоплёнки в обратную от оси  $Ox$  сторону, а ось  $O_{\phi y_{\phi}}$  - совпадает с передним краем фотоплёнки и дополняет систему до левой. Начало единой маршрутной левой системы координат  $Ik_{\phi}$ , связанной с оцифрованным изображением, находится в геометрическом центре первого пикселя, расположенного в правом нижнем углу рулона фотоплёнки и имеющего размер  $\varepsilon$ . Ось  $In$  параллельна оси  $O_{\phi y_{\phi}}$ , а ось  $Ik$  направлена через геометрические центры первых пикселей строк оцифрованного изображения параллельно нижней границе рулона фотоплёнки и оси  $O_{\phi x_{\phi}}$ .

На рисунке 4 видно, что для того, чтобы на интервале съёмки не было сдвигов изображения, в любой момент времени должны выполняться следующие условия:

$$V^{\text{II}}(t) = -V^{\phi}(t) = \text{const}; V_y^{\phi}(t) = 0; V_x^{\phi}(t) = V^{\phi}(e) = -V^{\text{II}}(e); \quad (1)$$

$$V_x(t) = V_x^{\phi}(t) \cdot \cos \psi; V_y(t) = V_x^{\phi}(t) \cdot \sin \psi, \quad (2)$$

где  $V_x^{\phi}(t), V_y^{\phi}(t), V_x(t), V_y(t)$  - составляющие вектора скорости движения изображения (СДИ) соответственно в системе координат фотоплёнки  $O_{\phi x_{\phi} y_{\phi}}$  и в системе координат камеры  $Oxy$ .

Для математического описания процессов построения единого панорамного изображения и контроля выполнения при этом условий (1) - (2) были разработаны соответственно геометрическая модель маршрутной панорамной съёмки и кинематическая модель СДИ в ФП камеры KVR-1000. Последняя описывается следующей системой уравнений:

$$V_X(t) = -\omega_{CK}(t) \cdot f + \omega_3 \cdot a_{32}(t) \cdot f + \frac{a_{33}(t) \cdot f}{Z_{II} - Z_S(t)} \left[ \dot{X}_S(t) a_{11}(t) + \dot{Y}_S(t) a_{21}(t) + \dot{Z}_S(t) a_{31}(t) \right]; \quad (3)$$

$$V_Y(t) = \omega_3 \cdot a_{31}(t) \cdot f + \frac{a_{33}(t) \cdot f}{Z - Z_S(t)} \left[ \dot{X}_S(t) a_{12}(t) + \dot{Y}_S(t) a_{22}(t) + \dot{Z}_S(t) a_{32}(t) \right], \quad (4)$$

где  $X_S(t), Y_S(t), Z_S(t), \dot{X}_S(t), \dot{Y}_S(t), \dot{Z}_S(t)$  - составляющие координат и скорости движения КА в гринвичской системе координат;  $a_{ij}(t) = F(\eta, \phi, \gamma, \alpha(t), \beta(t), \chi(t), i, \Omega, u(t))$  - элементы матрицы направляющих косинусов, описывающих угловую ориентацию линии визирования в гринвичской системе координат;  $\omega_{CK}$  - угловая скорость сканирования головного зеркала;  $\omega_3$  - угловая скорость вращения Земли;  $f$  - фокусное расстояние камеры;  $\eta, \phi, \gamma$  - угловые элементы выставки ЭЩ относительно конструктивных осей КА;  $\alpha(t), \beta(t), \chi(t)$  - углы тангажа, крена и рыскания КА;  $i, \Omega, u(t)$  - наклон, долгота восходящего узла и аргумент широты орбиты КА;  $Z = (N(1 - e^2) + H) \sin B$ ;  $N, e_3$  - радиус кривизны первого вертикала и эксцентриситет общего земного эллипсоида ПЗ-90,  $B, H$  - геодезическая широта и высота точки пересечения главной оптической оси камеры.

Кинематическая модель (3) обеспечивает нахождение и контроль постоянства значений  $V_X(t)$  и  $V_Y(t)$  на всём интервале съёмки в гринвичской системе координат, определяя тем самым области допустимых значений для моделируемых параметров съёмки, а именно, для линейных и угловых элементов внешнего ориентирования, скорости  $V^H$  протяжки фотоплёнки, длительности  $\Delta t_{CK}$  каждого скана, угла разворота  $\psi$  фотоплёнки относительно экспонирующей щели, начального  $\varphi_{min}$  и конечного значения  $\varphi_{max}$  угла панорамирования  $\varphi(t)$  и угловой скорости сканирования  $\omega_{CK}$ . При этом в качестве исходных данных используются заданный формат скана на плёнке и известные на момент включения съёмочной аппаратуры значения знаменателя масштаба съёмки, углов тангажа, крена и рыскания КА, элементов вектора состояния КА.

Основные зависимости, описывающие геометрическую модель съёмки, получены в работе в формате «камера-местность» в виде трансцендентного уравнения относительно геодезической широты  $B$ :

$$F(B) = \cos^2 B - \frac{1}{N(B)} \cdot \{ X_S^2(t) + Y_S^2(t) + 2 \frac{\Delta Z(B)}{U_Z(t)} \cdot [X_S(t) U_X(t) + Y_S(t) U_Y(t)] + \frac{\Delta Z^2(B)}{U_Z^2(t)} \cdot [U_X^2(t) + U_Y^2(t)] \} = 0, \quad (5)$$

где  $N(B) = (N + H)^2$ ;  $\Delta Z(B) = (N(1 - e^2) + H) \sin B - Z_S(t)$ ;

$$U_X(t) = [a_{11}(t) x^* + a_{12}(t) y^* + a_{13}(t) f];$$

$$U_Y(t) = [a_{21}(t) x^* + a_{22}(t) y^* + a_{23}(t) f];$$

$$U_Z(t) = [a_{31}(t) x^* + a_{32}(t) y^* + a_{33}(t) f];$$

$x^*, y^*$  - координаты точек единого панорамного изображения в системе координат ФП Оху в моменты времени  $\tau_k$  их формирования при прохождении ЭЩ на интервале съёмки.

Уравнение (5) решается методом хорд при начальном приближении значений геодезической широты на концах отрезка  $B^{(0)} = (B_{\text{пт}} - 3^0, B_{\text{пт}} + 3^0)$ . После нахождения геодезической широты  $B$  далее вычисляются геоцентрические координаты  $\{X, Y, Z\}$  пикселей  $k=; n=$  оцифрованного единого панорамного изображения по формулам

$$X = X_s(t) + \Delta Z(B) \times \frac{U_x(t)}{U_z(t)} ; \quad (6)$$

$$Y = Y_s(t) + \Delta Z(B) \times \frac{U_y(t)}{U_z(t)} ;$$

$$Z = Z_s(t) + \Delta Z(B),$$

Математическое описание перехода «снимок-камера» получено в работе в виде формул преобразования порядковых номеров  $k, n$  пикселей единого оцифрованного панорамного изображения в координаты ФП камеры, которые имеют следующий вид:

$$y^* = \left[ \left( n - \frac{N}{2} \right) \times \varepsilon + \varepsilon / 2 \right] \times \cos \psi ; x^* = - \left[ \left( n - \frac{N}{2} \right) \times \varepsilon + \varepsilon / 2 \right] \times \sin \psi ; \quad (7)$$

$$\tau_k = k \frac{\varepsilon}{V_{\text{п}}} ; \quad (8)$$

$$\psi = \text{tg} \frac{V_y(t)}{V_x(t)}. \quad (9)$$

Таким образом, полученные аналитические соотношения (1) - (9) описывают связь между порядковыми номерами  $k, n$  пикселей оцифрованного единого панорамного изображения и геоцентрическими координатами  $X, Y, Z$  соответствующих им точек местности в формате «снимок-камера-местность» с учётом движения продольной и поперечной составляющих скорости движения изображения в ФП камеры. Этот комплекс моделей отличается от известных моделей строгим математическим описанием процессов формирования геометрической структуры и элементов внешнего ориентирования одиночных панорамных снимков в формате единого панорамного изображения маршрута съёмки и возможностью контроля и учёта параметров смаза без использования опорных точек.

**В третьей главе** представлена методика фотограмметрической обработки одиночных снимков маршрута космической панорамной съёмки в формате «снимок-камера-местность», структурно-функциональная организация разработанного программного обеспечения этих процессов, а также результаты экспериментальных исследований разработанной методики на макетных данных. Рассмотрим содержание полученных результатов исследований более подробно.

Необходимость совершенствования существующих методик фотограмметрической обработки одиночных снимков маршрута космической панорамной съёмки обусловлена следующими двумя обстоятельствами:

большим объёмом опорной информации, требующейся для уточнения ЭВО всех восьми одиночных снимков маршрута съёмки и итерационным характером использования ЦМР при последующем определении пространственных координат точек земной поверхности в полосе захвата маршрута съёмки. В соответствие с этим разработанная методика направлена на уменьшение объёма используемой опорной информации и безытерационный характер последующих вычислений, и включает в себя два этапа. Первый связан с уточнением по опорным точкам местности ЭВО не для каждого одиночного снимка, а для всего маршрута съёмки, второй – с определением геоцентрических координат точек местности в полосе захвата маршрута съёмки по уточнённым значениям параметров съёмки на основе безытерационного применения ЦМР. Рассмотрим их суть более подробно.

Отличия первого этапа, определяющие его научную новизну, состоят в следующем. Во-первых, геометрическая модель панорамной съёмки используется в формате «камера-местность» с тремя независимыми уравнениями (6) в геоцентрической системе координат. Это позволило для каждой опорной точки сформировать систему из трёх уравнений поправок. Во-вторых, вместо поправок к текущим значениям параметров съёмки в работе определяются поправки к начальным условиям законов их изменения во времени и к коэффициентам полиномов, аппроксимирующих эти зависимости. Такой подход позволил перейти от уточнения многочисленных текущих значений геоцентрических координат КА и углов сканирования головного зеркала к уточнению начальных условий поступательного движения КА на момент включения камеры, начального угла и угловой скорости сканирования головного зеркала, и девяти коэффициентов полиномов  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_3$  для углов тангажа  $\alpha(t)$ , крена  $\beta(t)$  и рыскания  $\chi(t)$  КА. Вследствие этого полученная в работе система уравнений поправок

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(X, Y, Z)}{\partial(X_s(t), Y_s(t), Z_s(t), \dot{X}_s(t), \dot{Y}_s(t), \dot{Z}_s(t))} \times \frac{\partial(X_s(t), Y_s(t), Z_s(t), \dot{X}_s(t), \dot{Y}_s(t), \dot{Z}_s(t))}{\partial(X_s(t_0), Y_s(t_0), Z_s(t_0), \dot{X}_s(t_0), \dot{Y}_s(t_0), \dot{Z}_s(t_0))} \times \begin{pmatrix} \Delta X_s \\ \Delta Y_s \\ \Delta Z_s \\ \Delta \dot{X}_s \\ \Delta \dot{Y}_s \\ \Delta \dot{Z}_s \end{pmatrix} + \\
 & + \frac{\partial(X, Y, Z)}{\partial(\psi)} \times (\Delta \psi) + \frac{\partial(X, Y, Z)}{\partial(\alpha(t))} \times \frac{\partial(\alpha(t))}{\partial(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)} \times \begin{pmatrix} \Delta \alpha_1 \\ \Delta \alpha_2 \\ \Delta \alpha_3 \end{pmatrix} + \frac{\partial(X, Y, Z)}{\partial(\beta(t))} \times \frac{\partial(\beta(t))}{\partial(\beta_1, \beta_2, \beta_3)} \times \begin{pmatrix} \Delta \beta_1 \\ \Delta \beta_2 \\ \Delta \beta_3 \end{pmatrix} + \\
 & + \frac{\partial(X, Y, Z)}{\partial(\chi(t))} \times \frac{\partial(\chi(t))}{\partial(\chi_1, \chi_2, \chi_3)} \times \begin{pmatrix} \Delta \chi_1 \\ \Delta \chi_2 \\ \Delta \chi_3 \end{pmatrix} + \frac{\partial(X, Y, Z)}{\partial(\varphi(t))} \times \frac{\partial(\varphi(t))}{\partial(\varphi_0, \omega_{CK})} \times \begin{pmatrix} \Delta \varphi_0 \\ \Delta \omega_{CK} \end{pmatrix} + L^{(0)} - \tilde{L} = V
 \end{aligned} \quad (10)$$

включает в себя восемнадцать неизвестных, общих для всех восьми одиночных снимков маршрута съёмки. Отсюда следует, что для получения переопределённой системы уравнений поправок минимально необходимо иметь семь опорных точек местности. Полученные в результате решения системы уравнений (10) методом наименьших квадратов уточнённые

значения параметров съёмки используются далее на втором этапе методики, научная новизна которого заключается в следующем.

Известная схема вычислений (рисунок 5) основана на непосредственном подключении ЦМР к геометрической модели съёмки по методу приближений.

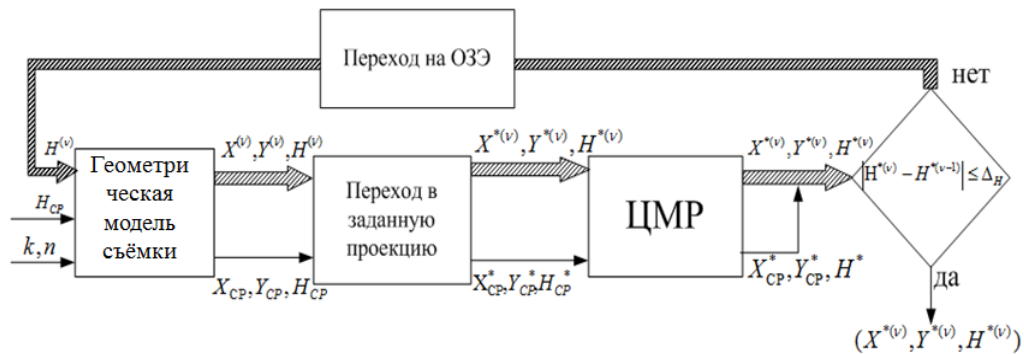


Рис. 5. Существующая схема определения координат по ЦМР

Такая организация вычислительного процесса позволяет в итерационном режиме по первоначальному значению средней геодезической высоты  $H_{cp}$  в районе съёмки уточнить для каждой точки снимка значения соответствующей ей нормальной  $H^{*(v)}$  и геодезической высоты  $H$ . Однако, такой подход обуславливает значительный уровень вычислительных затрат. Суть второго этапа разработанной методики состоит в исключении геометрической модели съёмки из итерационного процесса за счёт двухконтурной организации вычислительных процедур (рисунок 6).

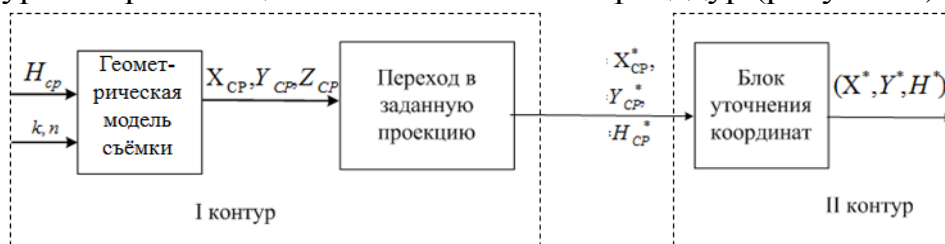


Рис. 6. Схема определения координат по ориентирующим углам линии визирования

В соответствии с этим геометрическая модель съёмки (6) составляет первый контур и служит для однократного расчета приближённых значений геоцентрических координат  $X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp}$  по значению  $H_{cp}$ . Эти значения преобразуются в плоские координаты  $X_{cp}^*, Y_{cp}^*$  и нормальную высоту  $H_{cp}^*$  в заданной картографической проекции и служат основой для нахождения искомых координат и расчёта ориентирующих углов линии визирования.

Графическая иллюстрация разработанной методики представлена на рисунке 7, а формулы безытерационного уточнения координат имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 X^* &= X_{cp}^* + [H_{ВП}^*(X_{cp}^*, Y_{cp}^*) - H_{cp}^*] \cdot \text{ctg} \delta(t) \cdot \cos \theta(t); \\
 Y^* &= Y_{cp}^* + [H_{ВП}^*(X_{cp}^*, Y_{cp}^*) - H_{cp}^*] \cdot \text{ctg} \delta(t) \cdot \sin \theta(t); \\
 H^* &= H_{ВП}^*(X^*, Y^*),
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

где  $\theta(t), \delta(t)$  - ориентирующие углы линии визирования,  $H_{ВП}^*(X_{cp}^*, Y_{cp}^*)$  - значение нормальной высоты точки пересечения линии визирования со средней горизонталью высотного профиля по ЦМР,  $H_{cp}^*$  - среднее значение нормальной высоты точек местности в полосе захвата съёмочной аппаратуры; - высота КА над поверхностью референц-эллипсоида;

$$\theta(t) = \arctg \frac{Y_{cp}^* - Y_s^*(t)}{X_{cp}^* - X_s^*(t)}; \delta(t) = \arctg \frac{H_{КА}}{\sqrt{[X_{cp}^* - X_s^*(t)]^2 + [Y_{cp}^* - Y_s^*(t)]^2}}; \quad (12)$$

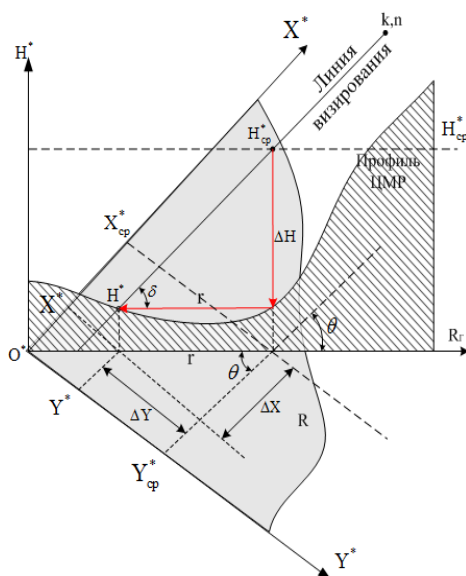


Рис. 7. Графическая иллюстрация определения координат по ориентирующим углам линии визирования

На рисунке 7 видно, что вычисленные по формулам (11) - (12) поправки  $\Delta X = [(H_{ВП}^* \cdot (X_{cp}^*, Y_{cp}^*) - H_{cp}^*) \cdot ctg \delta(t) \cdot \cos \theta(t)]$ ;  $\Delta Y = (H_{ВП}^* \cdot (X_{cp}^*, Y_{cp}^*) - H_{cp}^*) \cdot ctg \delta(t) \cdot \sin \theta(t)$  переводят приближённые значения  $X_{cp}^*, Y_{cp}^*$  плановых координат в непосредственную окрестность их истинных значений. В работе показано, что использование ориентирующих углов линии визирования позволяет получить безытерационный процесс вычислений за счёт учёта её положения в горизонтальной и вертикальной плоскости ЦМР и тем самым существенно снизить уровень вычислительных затрат.

Поскольку целью экспериментального исследования в работе являлось получение относительных, а не абсолютных количественных оценок точности разработанной методики, вместо проверки на реальных данных был выбран инструментарий математического моделирования и использованы макетные данные космической панорамной съёмки. В соответствие с этим разработанные модели и методика доведены до алгоритмической и программной реализации в среде разработки CodeGear RAD Studio, Delphi 2007, язык программирования Object Pascal. Структурно-функциональная организация программного обеспечения представлена в работе и включает в себя семь объединённых в один программный комплекс программных

модулей, позволяющих провести математическое моделирование рассматриваемых процессов.

Схема проведения экспериментальных исследований включала в себя три этапа. На первом этапе был выбран тестовый участок земной поверхности, представляющий собой седьмую зону проекции Гаусса-Крюгера, на которую имелась ЦМР с характеристиками, соответствующими топографической карте масштаба 1:100 000. На втором этапе была выполнена процедура моделирования (таблица 1) параметров орбиты КА, конструктивных характеристик и метаданных съёмки, характерных для съёмочной аппаратуры KVR -1000.

Таблица 1

Состав и значения моделируемых параметров съёмки

Конструктивные характеристики съёмочной аппаратуры
$\{d_{\text{ш}} = 0,909054 \times 10^{-5} \text{ м}; L_{\text{ш}} = 0,18 \text{ м}; d_{\text{п}} = 0,18 \text{ м}; L_{\text{п}} = 0,72 \text{ м}\};$ $\{\phi = 0, \gamma = 0, \eta = 0; x_{\text{ГЦ}} = 0, y_{\text{ГЦ}} = 0; f = 1 \text{ м}\}$
Параметры сканирования
$\left\{ \begin{array}{l} V^{\text{П}} = 0,145455 \text{ м/с}; V_x = -0,14545 \text{ м/с}; V_y = -0,001277 \text{ м/с}; \Delta t_{\text{СК}} = 4,95 \text{ сек}; \\ \omega_{\text{СК}} = 0,183069 \text{ рад/с}; \varepsilon = 0,909090 \times 10^{-5} \text{ м}; \varphi_{\text{min}} = -25^{\circ},96058, \varphi_{\text{max}} = 25^{\circ},96058; \\ \psi = 0,503^{\circ} \end{array} \right\}$
Формат макетного снимка
$\{ K = \overline{179200} \text{ строк}; N = \overline{119800} \text{ пикселей в строке}\}$
Начальные условия угловой ориентации КА
$\{ \alpha(t_0) = 0, \beta(t_0) = -25,96058^{\circ}, \chi_0(t_0) = 0 \}$
Начальные условия орбитального движения КА
$\left\{ \begin{array}{l} D = 8.05.2012, t_0 = 4^{\text{h}}09^{\text{m}}10,487^{\text{s}}, S(t_0) = 0,3018198, \\ \mathcal{E}(t_0) = \langle a = 6591302,0 \text{ м}; e = 0,003; i = 71^{\circ},6; \Omega = 31^{\circ},212; \omega_{\text{п}} = 12^{\circ},5; \vartheta(t_0) = 42^{\circ},27 \rangle \end{array} \right\}$

На третьем этапе с помощью разработанного программного обеспечения были построены восемь макетных одиночных панорамных снимков (рисунок 8) в системе ПЗ-90 и в проекции Гаусса-Крюгера.

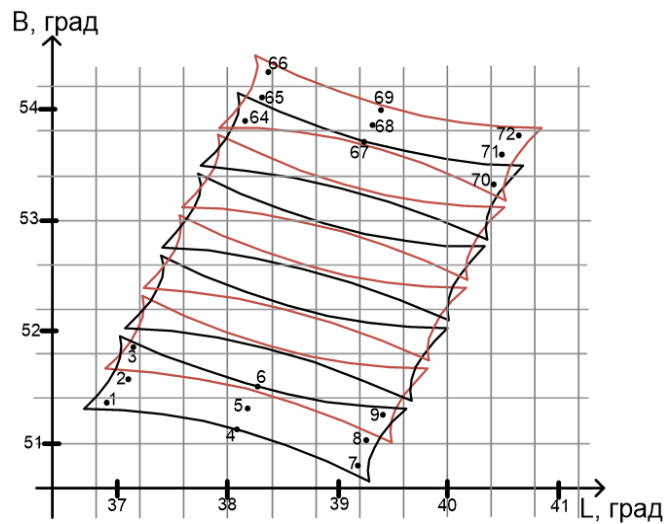


Рис.8. Построение полосы захвата маршрута панорамной съёмки

При этом моделировалось маршрутное включение съёмочной аппаратуры с длительностью 39,6 секунд. На каждом макетном снимке было определено по 9 равномерно расположенных макетных точек, т.е. всего 72 точки. Из них от 7 до 17 точек использовались в качестве опорных для исследования влияния числа опорных точек на степень уточнения параметров съёмки, остальные – в качестве контрольных. В соответствии со схемой исследования в макетные значения линейных, угловых ЭВО и других уточняемых параметров съёмки вводились возмущения, соответствующие уровню реальных ошибок их измерений. В частности, в начальные условия движения КА были введены ошибки 200 м по координатам и 0,1 м по скоростям, что, как показано в работе, обуславливает СКО определения координат 328,74 м; в угловые ЭВО – 0,5 град, что эквивалентно СКО определения координат с ошибкой 54,92 м (рисунок 9).



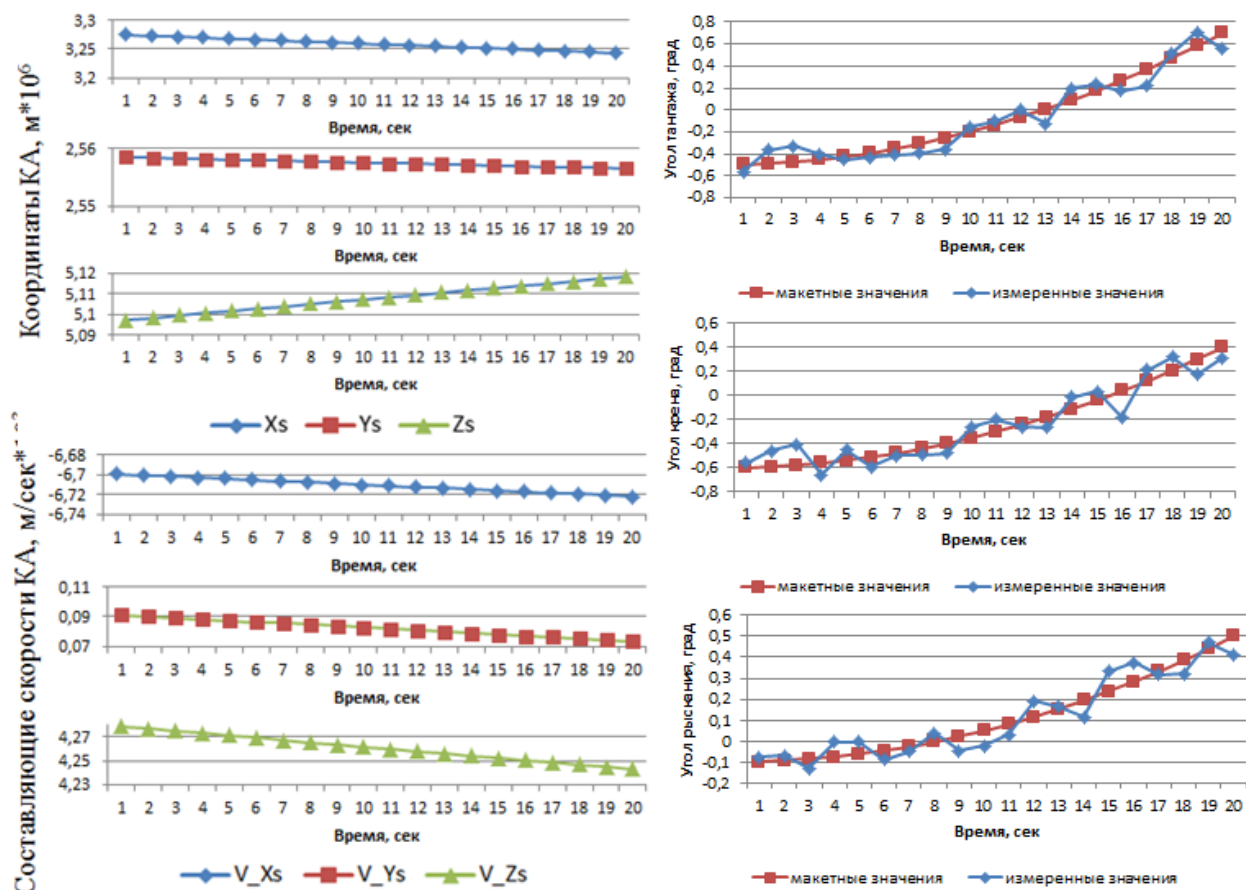


Рис.9. Моделирование ошибок измерений линейных и угловых ЭВО

Для проверки разработанной методики полученные в результате моделирования возмущённые значения ЭВО и других параметров съёмки использовались в качестве их приближённых значений. При этом СКО определения координат, обусловленная суммарным влиянием всех ошибок и рассчитанная по 72 макетным точкам маршрута съёмки, составила 452 м. Исследовался вариант равномерного расположения опорных точек (рисунок 10) среди и внутри одиночных снимков маршрута съёмки с оценкой зависимости СКО определения координат от числа используемых опорных точек. Главный результат выполненных экспериментальных исследований свидетельствует о том, разработанная методика обеспечивает пиксельную методическую точность определения пространственных координат точек земной поверхности с использованием уточнённых значений ЭВО и других параметров съёмки при существенно меньшем объёме используемой для их уточнения опорной информации. В целом проведенные исследования позволяют сформировать следующие практические рекомендации для организации фотограмметрической обработки материалов маршрутной панорамной съёмки.

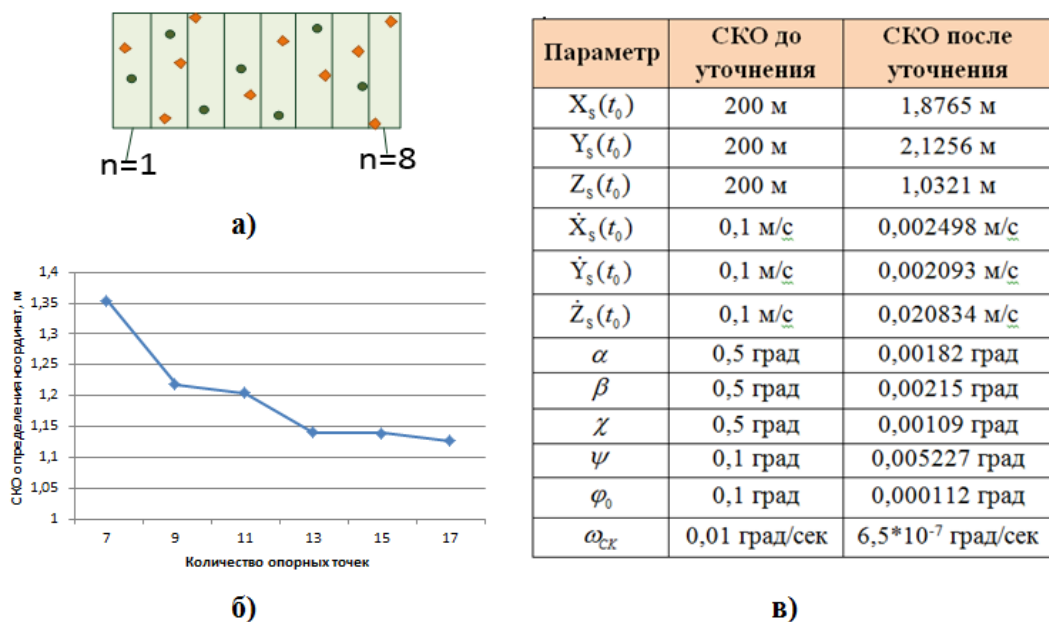


Рис.10. Результаты уточнения параметров съёмки: а) распределение опорных точек на маршруте съёмки; б) зависимости СКО определения координат от числа опорных точек; в) значения СКО уточняемых параметров.

Состав уточняемых параметров съёмки должен включать в себя начальные условия движения КА на момент включения камеры, начальный угол и угловую скорость сканирования головного зеркала, девять коэффициентов полиномов для углов тангажа, крена и рыскания КА и угол разворота фотоплёнки относительно ЭЦ съёмочной аппаратуры. При таком составе уточняемых параметров съёмки минимально необходимо иметь семь опорных точек в полосе захвата маршрута съёмки, причём наличие опорных точек на каждом из одиночных снимков маршрута съёмки не является обязательным и не приводит к повышению точности обработки материалов маршрутной съёмки. Наиболее высокие результаты применения методики обеспечиваются при равномерном расположении имеющихся опорных точек в полосе захвата маршрута съёмки, при этом двукратное увеличение их минимального числа приводит к росту точности определения координат не более, чем на 15%. Дальнейшее увеличение числа опорных точек не приводит к росту точности и повышает только вычислительные затраты.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе проведенных исследований получены следующие основные результаты.

1. На основе выявленных особенностей космической маршрутной панорамной съёмки в режимах сканирования головного зеркала съёмочной аппаратуры разработана геометрическая модель, обеспечивающая математическое описание процессов построения и внешнего ориентирования снимков в единой системе координат маршрута съёмки, что позволило объединить все одиночные снимки в рамках единого панорамного изображения.

2. Разработана кинематическая модель движения изображения в фокальной плоскости фотокамеры, устанавливающая функциональную связь

продольной и поперечной составляющих сдвига изображения с элементами внешнего ориентирования и параметрами сканирования головного зеркала, отличающаяся возможностью контроля и учёта параметров смаза при построении единого панорамного изображения маршрута съёмки.

3. Разработана методика фотограмметрической обработки маршрута снимков космической панорамной съёмки, основанная на уточнении параметров съёмки по опорным точкам местности и определении пространственных координат точек земной поверхности по этим уточнённым параметрам съёмки, отличающаяся меньшим составом уточняемых параметров съёмки, сокращением числа требующихся для этого опорных точек и безытерационным определением геоцентрических координат точек местности.

4. Проведено математическое моделирование процессов построения макетных панорамных изображений и исследование точности разработанной методики на макетных данных. Полученные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, разработанная методика обеспечивает пиксельную методическую точность определения пространственных координат точек земной поверхности с использованием уточнённых значений параметров съёмки при существенно меньшем объёме используемой для их уточнения опорной информации.

5. На основе полученных результатов исследования разработаны практические рекомендации для организации фотограмметрической обработки материалов маршрутной панорамной съёмки по составу уточняемых параметров маршрутной панорамной съёмки, выбору числа и расположения опорных точек на снимках, что позволяет повысить производительность и снизить стоимость фотограмметрических работ. Показано, что необходимо и достаточно иметь не более семи опорных точек в полосе захвата маршрута съёмки, причём наличие опорных точек на каждом из снимков маршрута не является обязательным. Установлено, что наиболее высокие результаты обеспечиваются при равномерном расположении имеющихся опорных точек в полосе захвата маршрута съёмки, при этом двукратное увеличение их числа приводит к росту точности определения координат не более чем на 15%, а дальнейшее увеличение числа опорных точек повышает только вычислительные затраты.

## **СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в центральных журналах из перечня ВАК**

1. Лазарева, Е.В. Общая постановка и решение прямой фотограмметрической задачи для моноскопических космических изображений [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Ключков, Е.В. Лазарева //

Информационно-измерительные и управляющие системы. - 2009. - № 4. - С.33-36.

2. Лазарева, Е.В. Модель формирования космических сканерных изображений в режимах панорамной съёмки [Текст] / В.Г. Андронов, С.В. Дегтярёв, Е.В. Лазарева. Информационно-измерительные и управляющие системы. - 2010. - № 11. - Т.8. - С.19-26.

3. Лазарева, Е.В. Общая георбитальная модель космической сканерной съёмки / В.Г. Андронов, С.В. Дегтярёв, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева [Текст] // Геоинформатика, ФГУП ГНЦ РФ – ВНИИгеосистем. - 2010. - № 1. - С.48-52.

4. Лазарева, Е.В. Ортогеокодирование космических сканерных изображений в заданной картографической проекции / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева [Текст] // Изв. Вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъёмка. - 2010. - №3. - С.47-50.

5. Лазарева, Е.В. Общая модель скорости движения космических сканерных изображений в инерциальном пространстве [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева, Т.В. Мордавченко // Изв. Вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъёмка. - 2010. - №4. - С.58-61.

6. Лазарева, Е.В. Фотограмметрическая модель космических панорамных изображений [Текст] / В.Г. Андронов, С.В. Дегтярёв, Е.В. Лазарева // Изв. Вузов. Приборостроение. - 2012. - Т.55. - №1. - С.19-24.

7. Лазарева, Е.В. Координатно-временная модель космических панорамных изображений в прямой и обратной задаче координатной привязки [Текст] / В.Г. Андронов, Е.В. Лазарева // Известия ЮЗГУ, сер. Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. - №1. - 2013. - С.91-95.

8. Лазарева, Е.В. Геометрическая модель космических панорамных изображений в прямой задаче координатной привязки [Текст] / В.Г. Андронов, Е.В. Лазарева // Известия ЮЗГУ, сер. Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. - №1. - 2013. - С.186-190.

9. Лазарева, Е.В. Геометрическая модель космических панорамных изображений в обратной задаче фотограмметрической обработки / В.Г. Андронов, Е.В. Лазарева, Ф.А. Старков // Курск. Известия Юго-Западного университета. - №3 (48). – 2013. - С.49-52.

#### **Свидетельства о регистрации электронного ресурса**

10. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №17059 от 04.05.2011. Модуль планирования прохождения трассы космического аппарата / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева. М.: Объединённый фонд электронных ресурсов «Наука и образование».

11. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №17156 от 31.05.2011. Модуль формирования программы трёхосного углового движения космического аппарата (оптико-электронная съёмка) / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева. М.: Объединённый фонд электронных ресурсов «Наука и образование».

12. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №17157 от 31.05.2011. Модуль геокодирования данных дистанционного зондирования Земли по среднему рельефу местности (панорамная и оптико-электронная съёмка) / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева. М.: Объединённый фонд электронных ресурсов «Наука и образование».

13. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №17341 от 31.05.2011. Модуль планово-высотной координатной привязки данных панорамной и оптико-электронной съёмки / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева. М.: Объединённый фонд электронных ресурсов «Наука и образование».

14. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №17395 от 31.08.2011. Пакет прикладных программ геоорбитального моделирования (космическая панорамная и оптико-электронная съёмка) / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева. М.: Объединённый фонд электронных ресурсов «Наука и образование».

#### **Статьи в сборниках статей и конференции**

15. Лазарева, Е.В. Общая постановка и решение прямой фотограмметрической задачи для космических изображений [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева // Программируемые инфокоммуникационные технологии. Сборник статей / Под ред. В.В. Александрова, В.А. Сарычева. М.: Радиотехника. - 2009-2010. - Вып.1. - С.33-36.

16. Лазарева, Е.В. Модель формирования космических сканерных изображений в режимах панорамной съёмки [Текст] / В.Г. Андронов, С.В. Дегтярёв, Е.В. Лазарева // Программируемые инфокоммуникационные технологии. Сборник статей / Под ред. В.В. Александрова, В.А. Сарычева. М.: Радиотехника. - 2010-2011. - С.19-26.

17. Лазарева, Е.В. Общая модель моноскопических космических изображений в прямой и обратной фотограмметрической задачах [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева // Геодезия, картография и кадастр – XXI век: тез. докладов Международной науч.-техн. конф., посвящённой 230-летию основания Московского государственного университета геодезии и картографии. М.: МИИГАиК. - 2009. - С.148-151.

18. Лазарева, Е.В. Основные направления использования результатов космической деятельности в интересах социально-экономического развития регионов Российской Федерации [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева // Актуальные проблемы инфокоммуникаций: материалы II Региональной науч.-практ. конф. Юго-Зап. гос. ун-т. Курск. - 2010. - С.37-40.

19. Лазарева, Е.В. Роль и место ортогеокодированных данных дистанционного зондирования обширных территорий в геоинформационном обеспечении регионов [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева // Актуальные проблемы инфокоммуникаций: материалы II Региональной науч.-практ. конф. Юго-Зап. гос. ун-т. Курск. - 2010. - С.74-77.

20. Лазарева, Е.В. Современное состояние и тенденции развития геоинформационного обеспечения социально-экономической деятельности

регионов [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева // Актуальные проблемы инфокоммуникаций: материалы II Региональной науч.-практ. Конф. Юго-Зап.гос.ун-т. Курск. - 2010. - С.71-74.

21. Лазарева, Е.В. Координатная привязка и ортокоррекция космических изображений в режимах панорамной съёмки со сканированием головным зеркалом [Текст] / В.Г. Андронов, Е.В. Лазарева // Перспективы развития информационных технологий: сб. материалов III Международной науч.-практ. конф. Новосибирск, ЦРНС. - ч.1. - 2011. - С. 18-22.

22. Лазарева, Е.В. Ортогеокодированные данные космической съёмки обширных территорий в геоинформационном обеспечении регионов [Текст] / И.А. Клочков, Е.В. Лазарева // Молодежь и современные информационные технологии: сб. материалов IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Т.: Томск, ТПУ. – 2011. – С. 220-221.

23. Лазарева, Е.В. Особенности построения векторных и растровых ЦМР при организации фотограмметрической обработки космических сканерных изображений / В.Г. Андронов, А.Н. Борисенко, А.Н. Воробьёв, [и др.] / Актуальные проблемы инфокоммуникаций: материалы III Региональной науч.-практ. конференции. Юго-Зап.гос.ун-т. Курск. - 2011. - С. 41-44.

24. Лазарева, Е.В. Методика макетирования и экспериментальной проверки орбитального метода геокодирования моноскопических маршрутов космических сканерных изображений с использованием ЦМР [Текст] / В.Г. Андронов, А.Н. Борисенко, Волобуев А.Н., И.А. Клочков, Е.В. Лазарева // Актуальные проблемы инфокоммуникаций: материалы III Региональной науч.-практ. конф. Юго-Зап.гос.ун-т. Курск. - 2011. - С. 38-41.

25. Лазарева, Е.В. Структурно-функциональная организация комплекса программ геоорбитального моделирования в задачах регионального геоинформационного обеспечения [Текст] / В.Г. Андронов, А.Н. Борисенко, И.А. Клочков, Е.В. Лазарева // Актуальные проблемы инфокоммуникаций: материалы III Региональной науч.-практ. конф. Юго-Зап.гос.ун-т. Курск. - 2011. - С.52-56.