

На правах рукописи

КЛОЧКОВ ИВАН АЛЕКСЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОДИНОЧНЫХ
КОСМИЧЕСКИХ СКАНЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия
(технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва– 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)» на кафедре Фотограмметрии и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «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, Центральный научно-исследовательский
институт геодезии, аэросъемки и картографии,
заведующий отделом

Гречищев Александр Владимирович
кандидат технических наук, инновационный научно-
образовательный центр «Геомониторинг»
Московского государственного университета
геодезии и картографии, директор

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

Защита состоится «25» декабря 2012 года в ___ 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, зал заседаний Ученого совета.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета



Краснопевцев Б.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время космические сканерные снимки высокого разрешения находят все большее применение при создании и обновлении карт различного назначения, цифровых моделей местности и расположенных на ней объектов и решении многих других задач. Научная база организации процессов их фотограмметрической обработки для этих целей достаточно глубоко проработана. Широкое распространение получили технологии использования бортовых данных об элементах внешнего ориентирования снимков, методы обработки снимков в условиях недоступности метаданных съёмки, внешнего ориентирования фотограмметрических моделей по опорным точкам местности, полиномиальные методы на основе коэффициентов RPC и многие другие.

Вместе с тем, появление новых космических оптико-электронных комплексов сверхвысокого разрешения, работающих в режиме временной задержки и накопления зарядовых пакетов и способных выносить линию визирования вдоль, перпендикулярно и поперёк трассы КА, кардинально изменило геометрию, длительность и другие важнейшие характеристики космической съёмки. На смену традиционных объектовых режимов кратковременного включения с постоянным ракурсом съёмки пришли маршрутные и площадные режимы съёмки с большой длительностью включения и трёхосным угловым движением КА. В этих условиях использование существующих технологий для обработки сканерных изображений в масштабах включения съёмочной аппаратуры оказалось крайне затруднительным и обусловило необходимость разбиения маршрута съёмки на условные кадры (сцены). Это, в свою очередь, привело к необходимости существенного увеличения числа опорных точек, требуемых для внешнего ориентирования используемых фотограмметрических моделей, и, в конечном счёте, к увеличению трудоёмкости и стоимости фотограмметрических работ. Кроме этого, существующие технологии применимы только для обработки реальных изображений, и не годятся для моделирования рассматриваемых процессов для перспективных комплексов. В этой связи, учитывая планируемые в ближайшем будущем запуски отечественных комплексов сверхвысокого разрешения, тема решаемой в работе научно-технической задачи представляется актуальной.

Работа выполнена в соответствии с Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.», в рамках реализации мероприятия № 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук».

Цель работы: разработка и исследование методики фотограмметрической обработки одиночных космических сканерных изображений на основе математического описания процессов их формирования в масштабах включения съёмочной аппаратуры без использования опорных точек местности.

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

- анализ состояния вопросов фотограмметрической обработки одиночных сканерных изображений, обоснование выбора направлений исследования и математическая постановка задачи;
- разработка комплекса математических моделей космической сканерной съёмки с трёхосным угловым движением КА, инвариантных к длительности включения съёмочной аппаратуры, характеру рельефа местности и учитывающих не только геометрические, но и фотометрические характеристики формирующихся сканерных изображений;
- разработка и исследование методики координатной привязки одиночных космических сканерных изображений;
- разработка методики построения макетных сканерных изображений и проведение на них экспериментальных исследований по верификации разработанного комплекса моделей и оценке точности методики координатной привязки.

Объект исследования. Космические одиночные сканерные изображения земной поверхности.

Предмет исследования. Математические модели формирования и методики фотограмметрической обработки сканерных изображений, получаемых космическими оптико-электронными системами в режимах съёмки с трёхосным угловым движением КА.

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 использовался пакет ГИС MapInfo 10.1.

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной, которые выносятся на защиту:

- динамическая фотограмметрическая модель, устанавливающая функциональную связь между порядковыми номерами пикселей одиночного космического сканерного изображения и геоцентрическими координатами соответствующих им точек местности, и отличающаяся строгим математическим описанием геометрической структуры маршрута изображения и его элементов внешнего ориентирования в условиях трёхосного углового движения КА на интервале съёмки и отсутствия опорных точек местности;
- методика координатной привязки одиночных космических сканерных изображений, основанная на использовании ориентирующих углов линии визирования в горизонтальной и вертикальной плоскости ЦМР и отличающаяся учётом направленности итерационного процесса, обусловленной особенностями взаимного расположения линии визирования и ЦМР;

-методика построения макетных сканерных изображений, позволяющая осуществлять экспериментальные исследования процессов их фотограмметрической обработки, и отличающаяся отсутствием необходимости использования реальных бортовых и наземных измерений и включением в комплекс аналитических моделей местности и снимка контура орбитального планирования трасс КА.

Практическая значимость работы. Практическая значимость полученных результатов исследования определяется тем, что они, во-первых, дают методическую основу для совершенствования технологий фотограмметрической обработки одиночных космических сканерных изображений. Во-вторых, результаты исследования доведены до конкретной алгоритмической и программной реализации, работоспособность которых проверена экспериментальным путем на макетных данных.

Реализация и внедрение. Основные теоретические и практические результаты работы реализованы:

в НИР «Организация процессов разработки, формирования и актуализации ортогеокодированных данных дистанционного зондирования обширных территорий в интересах геоинформационного обеспечения социально-экономического развития регионов» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.»;

в ОАО «НИИ ТП» при разработке технических заданий на составные части ОКР «Эпизод», в программных комплексах для организации процессов наземной фотограмметрической обработки космических сканерных изображений орбитальным методом, в системных исследованиях по теме «Приём», связанной с созданием единой территориально-распределённой информационной системы дистанционного зондирования;

внедрены в учебном процессе Юго-Западного государственного университета при подготовке бакалавров по дисциплинам «Дистанционное зондирование Земли космическая фотограмметрия» и «Основы ГИС» в рамках направления подготовки бакалавров «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

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.).

Публикации. Результаты выполненных исследований и разработок отражены в 23 печатных работах, из них 8 статей в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий,

рекомендуемых ВАК. Получено 5 свидетельств о регистрации электронного ресурса.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателем проведен анализ состояния вопроса в области использования ГИС для обеспечения социально-экономической деятельности регионов [15-16], рассмотрена роль данных ДЗЗ в региональном геоинформационном обеспечении [14,17,20] и особенности формирования космических оптико-электронных изображения линейками матриц ПЗС [9], получен ряд формул в модели скорости движения космических сканерных изображений [6], разработана модель определения текущих значений угловых параметров космической оптико-электронной съемки [4,7,8], а также координатно-временная модель формирования геометрической структуры одиночных маршрутов ОЭИ [3], предложены этапы методик решения задач координатной привязки одиночных космических изображений [1,2,10], координатной привязки маршрутов космических сканерных изображений [5,11,12,18] и верификации разработанных моделей и алгоритмов [19-21], а также элементы структуры программного обеспечения геоорбитального моделирования в задачах регионального геоинформационного обеспечения [13,22,23].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и библиографического списка, включающего 121 наименование. Объем диссертации 151 страницы машинописного текста, 28 рисунков и 6 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 математического описания процессов формирования и фотограмметрической обработки сканерных изображений. Показано, что существующие методы можно разделить на две группы полиномиальных методов и фотограмметрические методы. Первая группа полиномиальных методов требовательна к наличию опорных точек на снимке, топологии их расположения по полю изображения и характеризуются высокой трудоемкостью процесса. Вторая группа полиномиальных методов использует так называемые коэффициенты рациональных полиномов, которые получают на основе применения строгой фотограмметрической модели. Показано, что точность фотограмметрической обработки, основанной на использовании полиномиальных методов, ниже, чем потенциальная точность фотограмметрических моделей. Кроме этого, обе группы полиномиальных методов не имеют физического смысла и не пригодны для моделирования рассматриваемых процессов. Фотограмметрические методы основаны на использовании строгих фотограмметрических моделей и потенциально могут быть реализованы в автоматическом режиме, а их точность определяется точностью исходных данных и теоретически соответствует разрешающей способности

космических изображений. Анализ существующих подходов к разработке строгих фотограмметрических моделей одиночных сканерных изображений, получаемых в режимах съёмки с трёхосным угловым движением КА, показал недостаточную проработанность этих вопросов.

Рассмотрены возможные пути решения этих вопросов, обоснован выбор направлений и структурно-логическая схема исследования, выполнена математическая постановка задачи.

Во второй главе представлены результаты теоретического обоснования комплекса моделей, названного в работе динамической фотограмметрической моделью. Этот комплекс в отличие от известных позволяет обрабатывать реальные изображения без использования опорных наземных точек в масштабах включения съёмочной аппаратуры при наличии метаданных, а также моделировать эти процессы при их отсутствии. В соответствии с этим он включает в себя три контура моделей (рис.1).

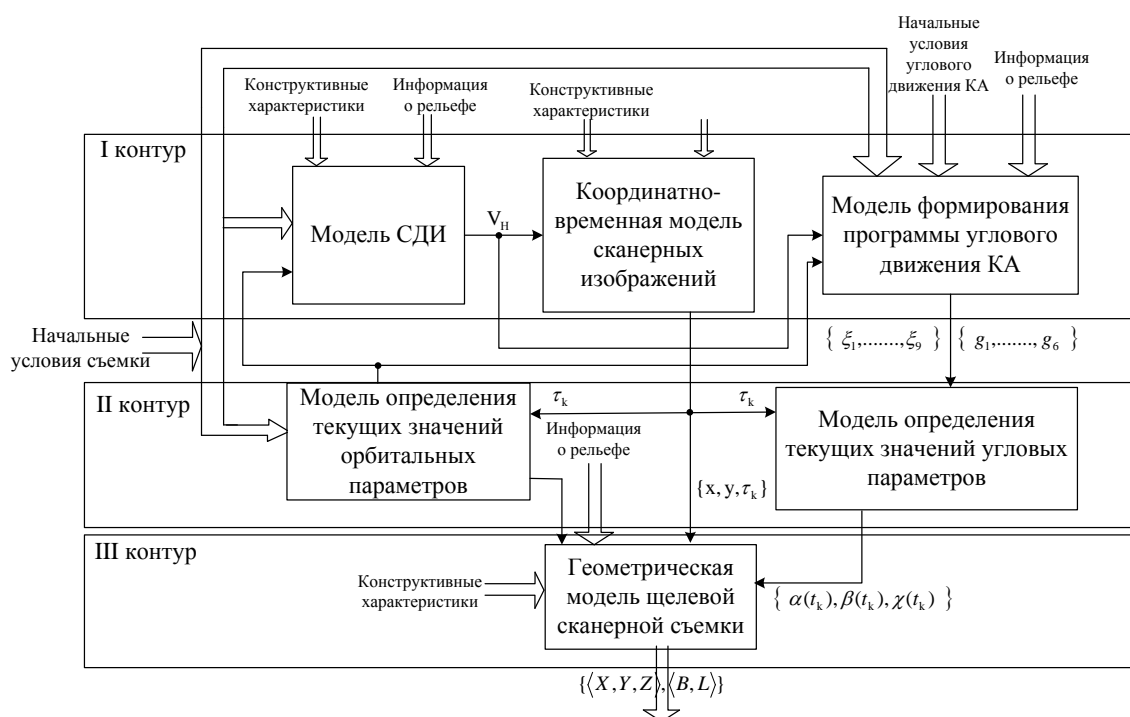


Рисунок 1 – Структура динамической фотограмметрической модели

Первый контур предназначен для моделирования геометрической структуры пикселей формирующегося сканерного изображения и угловых элементов их внешнего ориентирования в геоцентрической системе координат без использования опорных точек местности. Он включает в себя не имеющие аналогов в известной литературе модель скорости движения изображения (СДИ), модель формирования программы углового движения КА и координатно-временную модель одиночного сканерного изображения. Второй контур составляют модели, которые используются в интересах первого и третьего контура для моделирования текущих значений вектора состояния КА и параметров его угловой ориентации. Третий контур образует геометрическая модель щелевой сканерной съёмки, которая при наличии информации о геодезических высотах центральных проекций пикселей

изображения на общем земном эллипсоиде обеспечивает строгое вычисление их геоцентрических координат по данным первого и второго контура.

Рассмотрим суть входящих в первый контур моделей более подробно.

В качестве фотоприёмной структуры (ФПС) в комплексах сверхвысокого разрешения используются матрицы ПЗС, расположенные в два ряда в шахматном порядке вдоль экспонирующей щели перпендикулярно направлению полёта КА (рис.2).

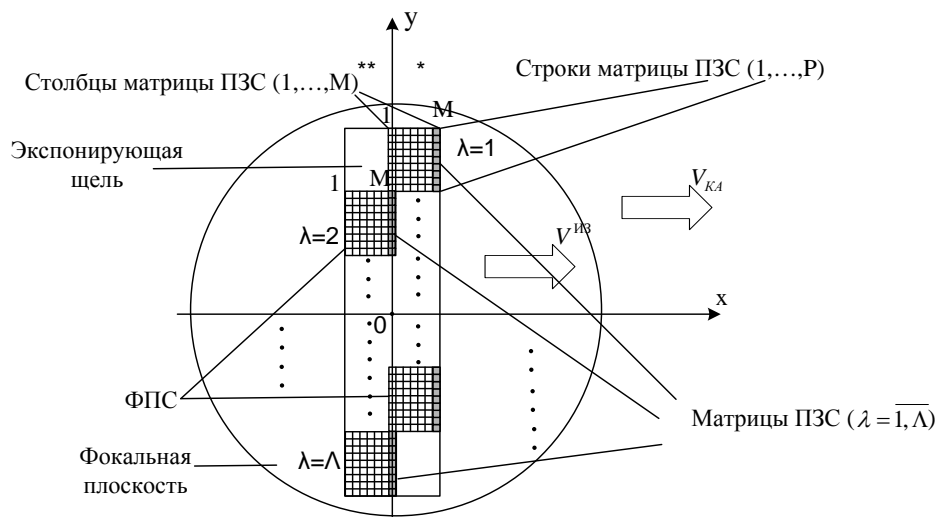


Рисунок 2 - Топология фотоприёмной структуры

*,** - нечетный и четный ряд матриц, $V^{ИЗ}$ - скорость движения изображения

Формат маршрута съёмки на местности определяется размером мгновенной проекции экспонирующей щели и длительностью включения съёмочной аппаратуры соответственно перпендикулярно и по направлению полёта КА. При этом процесс формирования маршрута изображения в обоих рядах матриц ПЗС происходит построчно за счёт одновременного периодического опроса матриц ПЗС с тактовой частотой $1/\tau_T$ в режиме задержки и накопления зарядовых пакетов от одного и того же участка местности. Суть этого режима состоит в том, что в течение времени τ_M зарядовые пакеты со скоростью V_x , равной продольной составляющей вектора $\bar{V}^{ИЗ}$ скорости движения изображения (СДИ), перемещаются по строкам матриц ПЗС от столбца 1 к столбцу с номером M по следующей схеме:

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \dots \rightarrow M-1 \rightarrow M \rightarrow \text{БЗУ} \left(\sum_1^M \right), \quad (1)$$

где БЗУ – бортовое запоминающее устройство.

В соответствии с этим зарядовые пакеты, сформированные в первых элементах строк матриц ПЗС в момент времени t , в течение последующего времени τ_M с таковой частотой $1/\tau_T$ последовательно передаются во вторые, третьи и последующие элементы строк матриц ПЗС, складываясь с образующимися в них зарядовыми пакетами от одного и того же участка местности. Достигнув элемента M , они далее считываются в БЗУ, образуя за

счёт M -кратного накопления зарядовых пакетов более качественное изображение этого участка местности в виде строки, состоящей из $N = P \times \Lambda$ пикселей. В геометрическом аспекте повышение разрешающей способности съёмочной аппаратуры происходит потому, что в процессе накопления зарядовых пакетов изменяется орбитальное положение и угловая ориентация КА, а плоскость визирования отслеживает сканируемый участок местности. Основываясь на этом, идеология выбранного в работе теоретического подхода для моделирования заключается в формализации этого процесса в виде программного трёхосного углового движения КА на всём интервале съёмки. Рассмотрим суть используемого подхода более подробно.

Пусть в некий фиксированный момент времени t вектор $\bar{r}(t) = (x(t), y(t), f)^T$ (рис.3) описывает положение зарядовых пакетов в первом столбце первой строки центральной матрицы ПЗС чётного ряда в системе координат $Sx|y|z'$, образованной путём параллельного переноса осей системы координат $oxyz$ фокальной плоскости в центр проекции S съёмочной аппаратуры, где f - фокусное расстояние съёмочной аппаратуры.

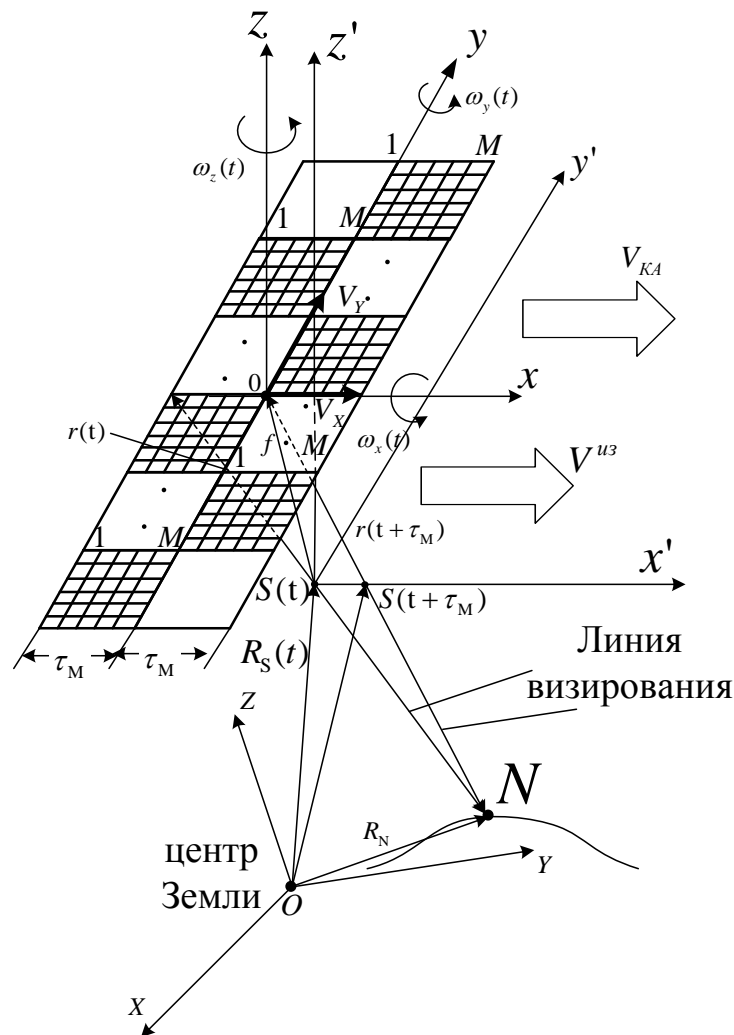


Рисунок 3 – Геометрическая иллюстрация режима задержки и накопления зарядовых пакетов в матрицах ПЗС

Тогда вектор $\overline{SN} = \overline{R}_N - \overline{R}_S(t)$ в тот же момент времени будет описывать положение соответствующей зарядовым пакетам точки N земной поверхности в системе геоцентрических координат OXYZ, а сами вектора $\overline{r}(t)$ и \overline{SN} связаны уравнением коллинеарности

$$\overline{r}(t) = \frac{1}{\mu(t)} A^T(t) (\overline{R}_N - \overline{R}_S(t)), \quad (2)$$

где $A^T(t) = f(\eta, \phi, \gamma, \alpha(t), \beta(t), \chi(t), i, \Omega, u(t))$ - матрица направляющих косинусов, описывающая ориентацию системы Sxyz относительно системы OXYZ, где η, ϕ, γ - угловые элементы выставки матриц ПЗС относительно конструктивных осей КА, $\alpha(t), \beta(t), \chi(t)$ - углы тангажа, крена и рысканья КА, $i, \Omega, u(t)$ - наклон, долгота восходящего узла и аргумент широты орбиты КА; $\overline{R}_S = (X_S(t), Y_S(t), Z_S(t))^T$ - радиус-вектор КА; $\mu(t)$ - коэффициент пропорциональности.

На рис.3 видно, что для обеспечения формирования изображения в соответствие со схемой (1) в каждый момент съёмки должны выполняться два условия, а именно, равномерность перемещения зарядовых пакетов по строкам матриц ПЗС

$$V_x(t) = V_H = \text{const}. \quad (3)$$

и постоянство направления их движения вдоль строк матриц ПЗС

$$\frac{\partial V_x(t)}{\partial y(t)} = 0; V_y(t) = 0. \quad (4)$$

Очевидно, что одновременное выполнение условий (3) и (4) на всём интервале съёмки обеспечивает синхронность движения зарядовых пакетов по всем строкам матриц ПЗС, предотвращая тем самым явления «смаза» и «сдвига» формирующегося маршрута изображения.

Основываясь на этом, формализация трёхосного углового движения КА заключалась в получении аналитических соотношений для составляющих $V_x(t), V_y(t)$, как функций от составляющих $\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)$ угловой скорости КА, подстановке в полученную систему уравнений условий (3),(4), и решении полученных выражений относительно $\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)$.

В соответствие с этим в работе, учитывая, что $\overline{V}^{H3} = dr(t)/dt = (dx(t)/dt, dy(t)/dt, dz(t)/dt)^T = (V_x, V_y, 0)^T$, путём дифференцирования уравнения (2) были получены строгие аналитические соотношения для расчёта составляющих СДИ

$$V_x(t) = \omega_x(t) \left[\frac{x(t)y(t)}{f} \right] + \omega_y(t) \left[-\frac{x^2(t)}{f} - f \right] + \omega_z(t) [y(t)] + \omega_3 \left[-a_{33}(t)y(t) + a_{32}(t) \left(f + \frac{x^2(t)}{f} \right) - a_{31}(t) \frac{y(t)x(t)}{f} \right] - \frac{1}{\mu(t)} \left\{ \frac{dX_S(t)}{dt} \left[\left(a_{11}(t) - \frac{x(t)}{f} a_{13}(t) \right) \right] + \frac{dY_S(t)}{dt} \left[\left(a_{21}(t) - \frac{x(t)}{f} a_{23}(t) \right) \right] + \frac{dZ_S(t)}{dt} \left[\left(a_{31}(t) - \frac{x(t)}{f} a_{33}(t) \right) \right] \right\}; \quad (5)$$

$$V_y(t) = \omega_x(t) \left[\frac{y^2(t)}{f} + f \right] + \omega_y(t) \left[-\frac{x(t)y(t)}{f} \right] + \omega_z(t) [-x(t)] + \omega_3 \left[a_{33}(t)x(t) - a_{31}(t) \left(\frac{y^2(t)}{f} + f \right) + a_{32}(t) \frac{x(t)y(t)}{f} \right] - \frac{1}{\mu(t)} \left\{ \frac{dX_S(t)}{dt} \left[\left(a_{12}(t) - \frac{y(t)}{f} a_{13}(t) \right) \right] + \frac{dY_S(t)}{dt} \left[\left(a_{22}(t) - \frac{y(t)}{f} a_{23}(t) \right) \right] + \frac{dZ_S(t)}{dt} \left[\left(a_{32}(t) - \frac{y(t)}{f} a_{33}(t) \right) \right] \right\}; \quad (6)$$

После этого, путём дифференцирования уравнения (5) по y , добавления найденное выражение к уравнениям (5), (6), и подстановки в эту систему уравнений условий (3),(4), была получена модель формирования программы трехосного углового движения КА

$$\overline{\omega}(t) = L^{-1} \times [\overline{V}(t) + \overline{Q}(t) - \overline{\omega}_3(t)], \quad (7)$$

где $\overline{\omega}(t) = (\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t))^T$, $\overline{V}(t) = (V_H, 0, 0)^T$, $\overline{Q}(t) = (q_1(t), q_2(t), q_3(t))^T$,

$$L = \begin{bmatrix} \frac{x(t)y(t)}{f} & -\frac{x^2(t)}{f} - f & y(t) \\ \frac{y^2(t)}{f} + f & -\frac{x(t)y(t)}{f} & -x(t) \\ \frac{x(t)}{f} & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \overline{\omega}_3(t) = \omega_3 \times \begin{bmatrix} -a_{33}(t)y(t) + a_{32}(t)(f + \frac{x^2(t)}{f}) - a_{31}(t)\frac{y(t)x(t)}{f} \\ a_{33}(t)x(t) - a_{31}(t)(\frac{y^2(t)}{f} + f) - a_{32}(t)\frac{y(t)x(t)}{f} \\ -a_{33}(t) - a_{31}(t)\frac{x(t)}{f} \end{bmatrix},$$

$$q_1(t) = \frac{1}{\mu_H(t)} \left\{ \frac{dX_S(t)}{dt} \left[(a_{11}(t) - \frac{x(t)}{f} a_{13}(t)) \right] + \frac{dY_S(t)}{dt} \left[(a_{21}(t) - \frac{x(t)}{f} a_{23}(t)) \right] + \frac{dZ_S(t)}{dt} \left[(a_{31}(t) - \frac{x(t)}{f} a_{33}(t)) \right] \right\};$$

$$q_2(t) = \frac{1}{\mu_H(t)} \left\{ \frac{dX_S(t)}{dt} \left[(a_{12}(t) - \frac{y(t)}{f} a_{13}(t)) \right] + \frac{dY_S(t)}{dt} \left[(a_{22}(t) - \frac{y(t)}{f} a_{23}(t)) \right] + \frac{dZ_S(t)}{dt} \left[(a_{32}(t) - \frac{y(t)}{f} a_{33}(t)) \right] \right\};$$

$$q_3(t) = \frac{a_{32}(t)}{Z - Z_S(t)} \times \mu(t) \times q_1(t), \quad \omega_3 \quad - \quad \text{угловая скорость вращения Земли,}$$

$\frac{dX_S(t)}{dt}, \frac{dY_S(t)}{dt}, \frac{dZ_S(t)}{dt}$ - составляющие скорости движения КА в геоцентрической системе координат.

Текущие значения компонент вектора угловой скорости на интервале съёмки получают путём интегрирования уравнения (7). В работе для удобства моделирования углового движения КА модель (7) получена и представлена в аналитическом виде в форме аппроксимирующих полиномов 2-й степени

$$\begin{aligned} \omega_x(\tau_k) &= g_1 + g_2 \times \tau_k; \\ \omega_y(\tau_k) &= g_3 + g_4 \times \tau_k; \\ \omega_z(\tau_k) &= g_5 + g_6 \times \tau_k, \end{aligned} \quad (8)$$

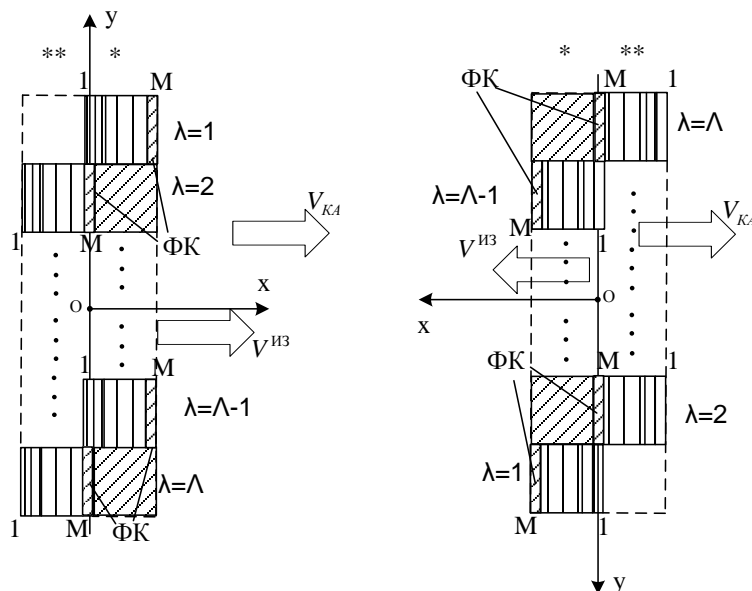
где g_1, \dots, g_6 - коэффициенты полиномов, τ_k - время формирования k -ой строки маршрута изображения на интервале съёмки, а соответствующие этой модели временные зависимости для углов тангажа, крена и рысканья КА – в форме полиномов 3-й степени:

$$\begin{aligned} \alpha(\tau_k) &= \zeta_1 + \zeta_2 \tau_k + \zeta_3 \tau_k^2; \\ \beta(\tau_k) &= \zeta_4 + \zeta_5 \tau_k + \zeta_6 \tau_k^2; \\ \chi(\tau_k) &= \zeta_7 + \zeta_8 \tau_k + \zeta_9 \tau_k^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Коэффициенты полиномов $\{ \zeta_1, \dots, \zeta_9 \}$ и элементы оскулирующей орбиты КА $i, \Omega, u(t)$ образуют состав угловых элементов внешнего ориентирования для всего маршрута съёмки в геоцентрической системе координат, а текущие значения углов тангажа, крена и рысканья – для строк маршрута изображения в орбитальной барицентрической системе координат.

Третья модель первого контура обеспечивает моделирование координатно-временной структуры $\{(k, n, x^*, x^{**}), (\tau_T, \tau_M, \tau_k)\}$ маршрута сканерного изображения, получаемого двумя рядами матриц ПЗС, размещённых в шахматном порядке вдоль экспонирующей щели, где k, n – порядковые номера пикселей маршрута изображения, x^*, x^{**} – абсциссы формирующих краёв матриц ПЗС в системе координат oxy фокальной плоскости, τ_T – тактовое время опроса матриц ПЗС, τ_M – продолжительность цикла накопления зарядовых пакетов.

В отличие от известных подходов, модель учитывает две ключевые особенности формирования сканерных изображений (рис.4), а именно, наличие двух полос изображения и формирующих краёв (ФК) матриц ПЗС.



а) На борту КА

б) в проекции на земле

Рисунок 4 – Особенности формирования сканерного изображения

Первая особенность вытекает из регистрации земной поверхности двумя рядами матриц ПЗС. При этом на борту КА формируются две полосы строк изображения (рис.4а), сформированных матрицами ПЗС соответственно нечётного и чётного ряда в одно и то же время. Проекция этих полос (рис.4б) образует на земной поверхности своеобразную гребёнку из пустот и участков изображений, расположенных перпендикулярно трассе КА. При этом матрицы чётного ряда производят опережающее формирование строк изображений соответствующих им участков местности относительно смежных с ними по оси oy пустых участков, помеченных на рисунках 4а,4б косой штриховкой. Строки изображения пустых участков формируются матрицами ПЗС нечётного ряда в режиме заметания, т.е.

позднее на величину времени $\tau_M = M \times \tau_T$, где $\tau_T = \Delta l_x / V_x$, Δl_x - размер элемента ПЗС по оси ox системы координат фокальной плоскости. Для устранения эффекта гребёнки в процессе наземной обработки производится процедура формирования единых составных строк, суть которой заключается в следующем (рис.5). С полосой участков изображений матриц чётного ряда, содержащую строки $k^{**} = \overline{1, K}$, сформированные в моменты времени $\{ \tau(k^{**}) \}$, совмещают полосу участков изображений матриц нечётного ряда, включающую в себя строки $k^* = \overline{M, (K+M)}$, сформированные позже на величину времени τ_M .

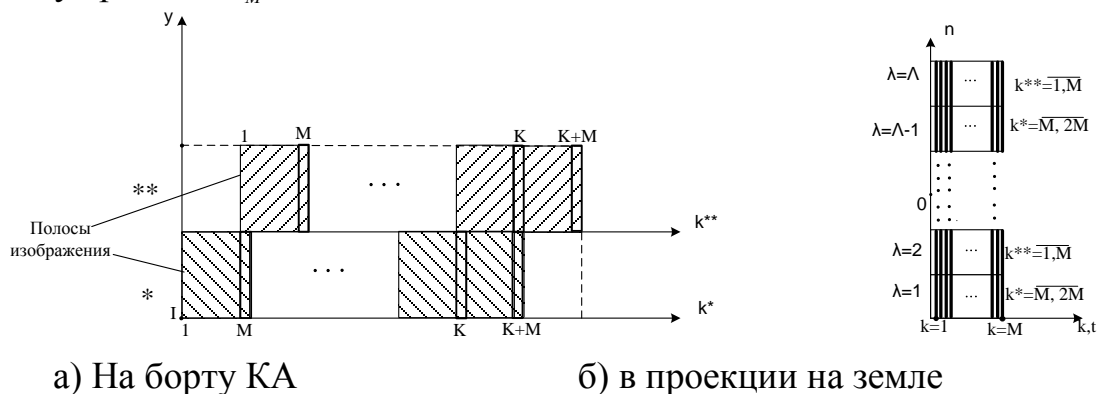


Рисунок 5 – Формирование единых составных строк маршрута сканерного изображения

Это означает, что маршрут сканерного изображения включает в себя $\{ k = \overline{1, K} \}$ единых составных строк, каждая из которых состоит из чередующихся между собой участков изображения, сформированных в порядке расположения матриц ПЗС. При этом участки, сформированные элементами ПЗС нечётного ряда матриц, имеют большее на величину τ_M время формирования τ_k .

Вторая особенность состоит в том, что моменты τ_k формирования строк строго соответствуют моментам считывания зарядовых пакетов с последних столбцов матриц ПЗС обоих рядов. В этой связи в работе эти столбцы (см. рис.4) названы формирующими краями (ФК) матриц ПЗС, поскольку они в геометрическом аспекте позиционирует связку проектирующих лучей в фокальной плоскости съёмочной аппаратуры. В работе показано, что это обуславливает необходимость использования в геометрических моделях сканерных изображений в качестве элементов внутреннего ориентирования координаты x^* , x^{**} ФК матриц ПЗС.

Модели второго контура предназначены для моделирования текущих значений орбитального положения и угловой ориентации КА по начальным условиям и текущему времени τ_k съёмки. При этом орбитальная модель входит в комплекс функционально и по условиям задачи формализована в работе в форме кеплеровской модели невозмущённого движения КА. Модель определения текущих значений угловых параметров съёмки получена в работе путём решения векторно-матричного уравнения (7) и представлена

аналогично программе углового движения КА (8) в аналитическом виде в форме полиномов третьей степени от времени (9).

Третий контур составляет геометрическая модель щелевой сканерной съёмки. Основное назначение геометрической модели состоит в вычислении геоцентрических координат точек земной поверхности по порядковым номерам $\{k, n\}$ и текущим значениям $\{\tau_k\}$ времени формирования пикселей маршрута изображения, координатам x^*, x^{**} ФК матриц ПЗС и текущим значениям орбитальных и угловых параметров съёмки. В соответствие с этим она представляет собой следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} X &= X_s(t) + (Z^{(v)} - Z_s(t)) \times \frac{U_x(t)}{U_y(t)}; \\ Y &= Y_s(t) + (Z^{(v)} - Z_s(t)) \times \frac{U_y(t)}{U_z(t)}; \\ Z^{(v)} &= (N^{(v)}(1 - e_{03Э}^2) + H) \times \sin B^{(v)}; \end{aligned} \quad (10)$$

В системе уравнений (10) приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \cos^2 B^{(v+1)} &= \frac{1}{N_B^{(v)}} \left\{ X_s^2(t) + Y_s^2(t) + \frac{2\Delta Z^{(v)}}{U_z(t)} \times [X_s(t)U_x(t) + Y_s(t)U_y(t)] + \frac{(\Delta Z^{(v)})^2}{U_z^2(t)} \times [U_x^2(t) + U_y^2(t)] \right\} \\ U_x(t) &= [a_{11}(t)x + a_{12}(t)y + a_{13}(t)f]; \Delta Z^{(v)} = \left[(N^{(v)}_{03Э}(1 - e_{03Э}^2) + H) \sin B^{(v)} - Z_s(t) \right]; \\ U_y(t) &= [a_{21}(t)x + a_{22}(t)y + a_{23}(t)f]; N^{(v)}_{03Э} = \frac{a_{03Э}}{\sqrt{(1 - e_{03Э}^2) \sin^2 B^{(v)}}}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$U_z(t) = [a_{31}(t)x + a_{32}(t)y + a_{33}(t)f]; N^{(v)}_B = (N^{(v)}_{03Э} + H)^2;$$

$a_{03Э}, e_{03Э}, N_{03Э}$ - большая полуось, эксцентриситет и радиус кривизны первого вертикала общего земного эллипсоида.

Первое уравнение в системе обозначений (11) при заданном значении H является трансцендентным относительно геодезической широты B и решено в работе методом приближений. При этом в качестве начального приближения полагалось, что $B^{(0)} = B_{пт}$, где $B_{пт}$ - геодезическая широта подспутниковой точки КА на общем земном эллипсоиде, соответствующая моменту t .

В отличие от известных моделей геометрическая модель щелевой съёмки она имеет три основных отличия.

Первое связано с тем, что под координатами x, y понимаются не координаты точек сканерного изображения, а абсцисса $x = \{x^*, x^{**}\}$ ФК матриц ПЗС и ордината y формирующего элемента ПЗС в системе координат фокальной плоскости. Второе отличие состоит в том, что в качестве элементов внешнего ориентирования разработанной геометрической модели используются компоненты вектора состояния КА на момент включения съёмочной аппаратуры и коэффициенты полиномов (9), аппроксимирующих угловое движение КА на интервале съёмки, которые имеют одни и те же значения для всех пикселей маршрута изображения. Это позволяет производить фотограмметрическую обработку сканерных изображений в масштабе включения съёмочной аппаратуры независимо от наличия или

отсутствия метаданных съёмки. При этом в первом случае обеспечивается автоматический режим обработки без использования опорных точек, а во втором – режим интерактивной обработки при существенном сокращении числа опорных точек. Третье отличие состоит в комплексном использовании геодезической и прямоугольной формы описания координат точек на общем земном эллипсоиде, что позволяет при решении обратной засечки в условиях отсутствия метаданных составлять для каждой опорной точки не два, а три независимых уравнения.

Третья глава посвящена разработке методики поточечной координатной привязки одиночных сканерным изображениям с использованием ориентирующих углов линии визирования и ЦМР. Необходимость совершенствования существующих подходов к решению этой задачи обусловлена значительными вычислительными затратами, связанными с непосредственным подключением ЦМР к фотограмметрической модели (ФГМ) по методу приближений (рис.6).

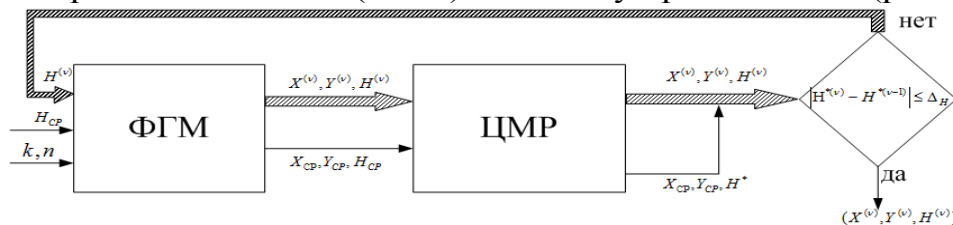


Рисунок 6 – Существующая схема координатной привязки одиночных снимков

Суть разработанной методики состоит в исключении ФГМ из итерационного процесса и двухконтурной организации вычислительных процедур (рис.7). Первый контур включает в себя разработанную динамическую фотограмметрическую модель (ДФГМ). Он обеспечивает однократное вычисление приближённых значений геоцентрических координат (X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}) точек земной поверхности, соответствующих заданному априорно среднему значению рельефа местности H_{CP} .



Рисунок 7 – Блок-схема методики координатной привязки

Второй контур состоит из блока пересчёта полученных в ДФГМ геоцентрических координат (X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}) в плоские координаты $X_{CP}^*, Y_{CP}^*, H_{CP}^*$ заданной картографической проекции, и блока уточнения планово-высотных координат точек, состоящего из разработанной модели уточнения координат и ЦМР. Процедура уточнения планово-высотных координат $X_{CP}^*, Y_{CP}^*, H_{CP}^*$ представлена на рисунке 8, на котором приняты следующие обозначения: угол θ - ориентирующий угол линии визирования в плоскости

местного горизонта, формализующий азимут съёмки; δ - ориентирующий угол линии визирования в плоскости профиля ЦМР, характеризующий возвышение КА над линией местного горизонта; $H^*(r) = f^*(X_r^*, Y_r^*)$ - ЦМР района съёмки.

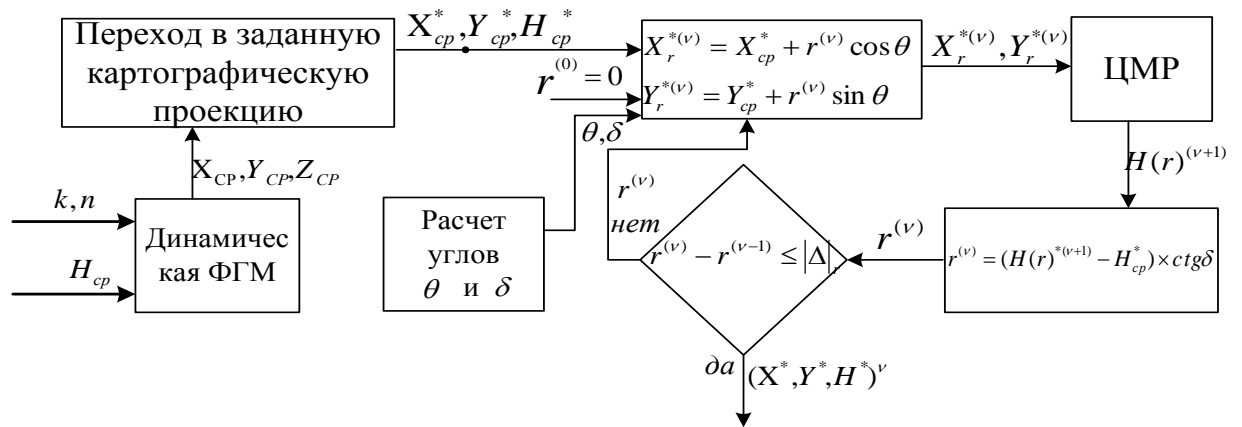


Рисунок 8 - Процедура уточнения плано-высотных координат во втором контуре

Разработанная методика в отличие от схемы на рис.6, во-первых, локализует итерационный процесс в отдельном от фотограмметрической модели вычислительном контуре, что сразу облегчает вычислительную нагрузку. Во-вторых, уточнение координат производится в декартовой системе с точно известным начальным приближением $r^{(0)} = 0$, простыми вычислительными формулами, линейной итерационной функцией и размерами прямолинейной рабочей области, не превышающими половину значений перепада высот в районе съёмки при любом характере рельефа местности. В-третьих, в работе представлены теоретические доказательства сходимости итерационного процесса и единственности получаемых результатов. В-четвёртых, использование ориентирующих углов θ, δ линии визирования КА в горизонтальной и вертикальной плоскости ЦМР, позволяет учесть направленность итерационного процесса, обусловленную особенностями взаимного расположения линии визирования и ЦМР, и характера рельефа местности.

Далее в рассматриваемой главе работы описан разработанный алгоритм координатной привязки, включающий в себя сорок операций, и обоснован выбор метода оценки точности при проведении экспериментальных исследований.

В четвертой главе представлена разработанная методика построения макетных сканерных изображений, а также полученные на их основе результаты верификации разработанных моделей и оценка точности разработанной методики координатной привязки. В завершении исследования рассмотрена структурно-функциональная организация разработанного комплекса программ геоорбитального моделирования.

На первом этапе макетирования был выбран тестовый участок земной поверхности, представляющий собой седьмую зону проекции Гаусса-Крюгера. Общая площадь участка составила 40 128 кв. км, линейные

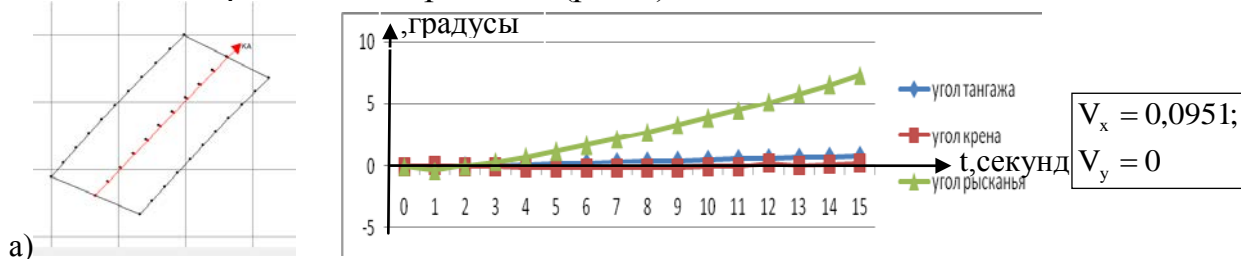
размеры - 157,712 км на 282,912 км, перепад высот - 304 м, средняя высота – 152 м. Для этого участка местности в СК-42 была выбрана ЦМР с шагом в плане и сечением горизонталей 20 м, СКО которой составила 10м. На середине этого участка была выбрана точка с координатами $B^* = 51,0^0$; $L^* = 38,0^0$, через которую должна проходить макетируемая трасса КА в момент включения съёмочной аппаратуры.

На втором этапе осуществлялась процедура расчёта параметров орбиты моделируемого КА на момент прохождения экватора Земли. В качестве такого КА был взят российский КА «Ресурс-ДК1» с известными в открытой литературе орбитальными параметрами, конструктивными характеристиками съёмочной аппаратуры и моделируемой датой съёмки 08.05.2011.

На третьем этапе, используя разработанный контур моделей планирования трасс КА, были рассчитаны параметры орбиты моделируемого КА на момент прохождения экватора Земли 08.05.2011 и выполнена проверка геометрии прохождения трассы КА по тестовому участку местности. Расчеты показали, что трасса КА проходит далеко в стороне от тестового участка. В этой связи по разработанным формулам, представленным в работе, была выполнена реконфигурация параметров орбиты, обеспечивающая прохождение трассы КА через заданную точку в заданную дату, и рассчитано требуемое для этого время включения съёмочной аппаратуры. Полученные новые параметры орбиты использовались далее в качестве начальных условий съёмки на момент включения съёмочной аппаратуры.

На четвёртом этапе макетирования для каждого моделируемого ракурса съёмки длительностью $\Delta\tau = 15$ (сек) с помощью моделей первого контура (см. рис.1) были рассчитаны значения номинальной СДИ и программы углового движения КА в форме уравнений (9). При этом начальные значения параметров углового движения КА $\{ \langle \alpha(t_0), \beta(t_0), \chi(t_0) \rangle \}$ варьировались от всех нулевых значений (в надире) до значений плюс 10 градусов сначала по каждому углу, а затем одновременно по всем углам.

На пятом этапе с помощью динамической ФГМ и классической схемой координатной привязки одиночных изображений вычислялись границы полос захвата съёмочной аппаратуры и плоские координаты 50-ти макетных точек, равномерно расположенных в рамках моделируемого маршрута изображения. Первые использовались для верификации разработанных моделей, а вторые – для оценки методических погрешностей разработанной методики координатной привязки (рис.9).



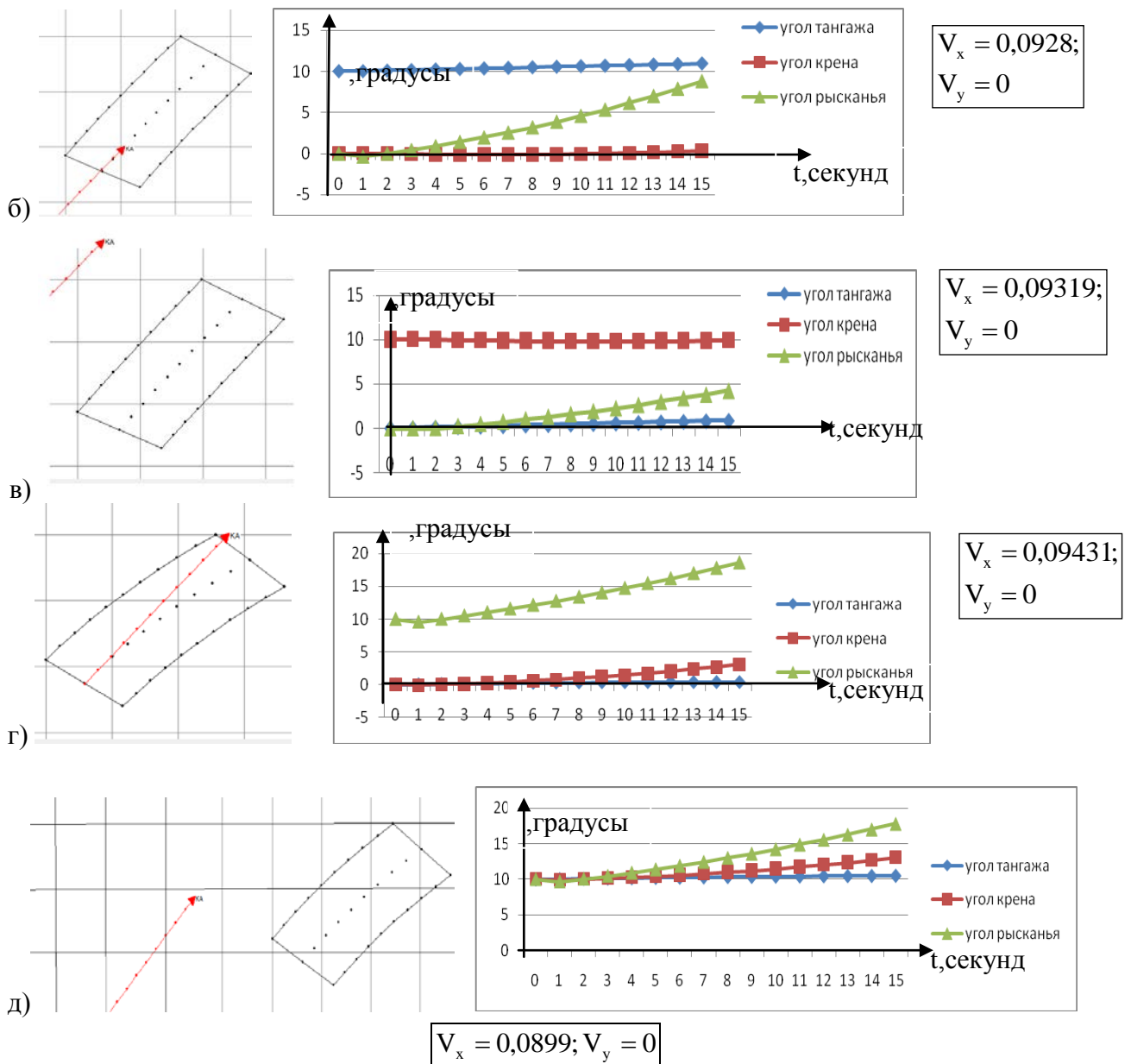


Рисунок 9 – Макетирование сканерных изображений

а) в надире; б) при изменении угла α ; в) при изменении угла β ; г) при изменении угла χ ; д) при изменении всех углов

Верификация проводилась путём отдельного и совместного анализа трёх групп результатов моделирования. Первая включала в себя формы, конфигурации и расположения макетных полос захвата для разных ракурсов съёмки, а именно, в надире, при отклонениях линии визирования отдельно углам тангажа, крена, рысканья и одновременном отклонении по всем трём углам. Вторая группа результатов моделирования - графики трёхосного углового движения КА для этих же ракурсов съёмки. Синим цветом на рис.9 показаны графики изменения углов тангажа, красным – углов крена и зелёным – углов рысканья КА. Третья группа – номинальные значения продольной и поперечной составляющих СДИ в каждом ракурсе съёмки. Теоретическая связь представленных графиков и полос захвата заключается в синхронном изменении формы и конфигурации полосы захвата в

соответствие с изменениями углов на графиках. Связь взаимного расположения полос и трассы КА - в соответствие с физической сущностью ракурсов съёмки. Например. В режиме съёмки с начальным отклонением по углу крена +10 градусов (рис.9в) углы тангажа и крена практически не меняются на всём интервале съёмки, а угол рысканья изменяется всего лишь на 5 градусов. В соответствие с этим (рис.9в) полоса захвата должна быть лишь слегка деформирована относительно трассы КА, и должна лежать вправо от трассы КА, что и видно в действительности. Проведенный в работе полный анализ показал, что полученные результаты моделирования полностью соответствуют своим теоретически ожидаемым значениям. Это свидетельствует о том, что разработанная динамическая ФГМ адекватна описываемым реальным процессам при любой длительности интервала съёмки.

Для получения количественных оценок точности и вычислительных затрат разработанной методики координатной привязки в соответствие с известной схемой (рис.6) рассчитывались координаты 50-ти точек, которые использовались далее в качестве контрольных. При этом на одинаковом вычислительном ресурсе и математическом аппарате фиксировалось число итераций для каждой точки. После этого выполнялось статистическая обработка контрольных и рассчитанных ранее с помощью разработанной методики 50-ти значений макетных точек и рассчитывалось значение σ^* (см. рис.9). Полученные оценки точности свидетельствуют о том, что средние квадратические ошибки координатной привязки одиночных сканерных изображений составляют в плане от 0,5 до одного пикселя. При этом число итераций при использовании разработанной методики во всех случаях не превысило двух, а при использовании традиционной составило не менее четырёх.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе проведенных исследований получены следующие основные результаты.

1. Разработан комплекс моделей, названный в работе динамической фотограмметрической моделью, обеспечивающий строгое математическое описание процессов формирования одиночных сканерных изображений в условиях трёхосного углового движения КА на интервале съёмки без использования опорных точек местности и учитывает не только геометрические, но и фотометрические характеристики формирующихся сканерных изображений в условиях трехосного углового движения КА.

2. Разработана методика координатной привязки, основанная на использовании динамической фотограмметрической модели и ориентирующих углов линии визирования в горизонтальной и вертикальной плоскости ЦМР, и отличающаяся учётом направленности итерационного процесса, обусловленной особенностями взаимного расположения линии визирования и ЦМР.

3. Разработана методика построения макетных сканерных изображений, позволяющая осуществлять экспериментальные исследования

процессов их фотограмметрической обработки и отличающаяся включением в комплекс аналитических моделей местности и снимка контура орбитального планирования трасс КА.

4. Разработанные методики доведены до алгоритмической и программной реализации, основываясь на которых осуществлено макетирование космических сканерных изображений и выполнена верификация разработанного комплекса моделей и оценка точности методики прямой засечки.

5. Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная динамическая фотограмметрическая модель адекватно описывает моделируемые процессы при любой длительности интервала съёмки без использования опорных точек, а методика координатной привязки при пиксельной точности обеспечивает существенное (в 2-3 раза) снижение вычислительных затрат.

2. СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в центральных журналах из перечня ВАК

1. Клочков И.А. Общая постановка и решение прямой фотограмметрической задачи по моноскопическим космическим изображениям [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков., Е.В. Лазарева // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009.–№ 4–т.7.–С. 33-36.

2. Клочков И.А. Фотограмметрическая модель космических сканерных изображений [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков.// Известия ВУЗов: Геодезия и аэрофотосъемка, 2010. – №2– С.56-62.

3. Клочков И.А. Общая геоорбитальная модель космической сканерной съёмки [Текст] / В.Г. Андронов, С.В. Дегтярев, И.А. Клочков., Е.В. Лазарева// Геоинформатика. - 2010. – №1. – С.48-52.

4. Клочков И.А. Ортогеокодирование космических изображений в заданной картографической проекции [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков., Е.В. Лазарева, Т.В. Мордавченко // Известия ВУЗов: Геодезия и аэрофотосъемка*.2010. – №3– С. 47-50.

5. Клочков И.А. Особенности формирования космических сканерных изображений линейками матриц ПЗС [Текст] / В.Г. Андронов, С.В. Дегтярев, И.А. Клочков.// Информационно-измерительные и управляющие системы.2010.– №7– т.8–С.11-15.

6. Клочков И.А. Общая модель скорости движения космических сканерных изображений в инерциальном пространстве [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков., Е.В. Лазарева // Известия ВУЗов: Геодезия и аэрофотосъемка.2010. – №4. – С. 58-61.

7. Клочков И.А. Формирование угловых параметров космической сканерной съёмки в режимах трёхосного программного управления осью визирования КА [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков, Т.В. Мордавченко // Изв.вузов. Геодезия и аэрофотосъемка .- №6.- 2010.- С.43-47.

8. Клочков И.А. Координатно-временная модель формирования космических сканерных изображений линейками матриц ПЗС [Текст] / В.Г. Андронов, Ю.Н. Волобуев, С.В. Дегтярев, И.А. Клочков.// Изв. вузов. Приборостроение. - №. - 9 - 2011.- С. 83-85.

Свидетельства о регистрации электронного ресурса

9. Клочков И.А. Модуль планирования прохождения трассы космического аппарата [Текст] /В.Г.Андронов, И.А.Клочков, Е.В. Лазарева. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №17059 от 04.05.2011.

10. Клочков И.А. Модуль формирования программы трёхосного углового движения космического аппарата (оптико-электронная съёмка) /В.Г.Андронов, И.А.Клочков, Е.В. Лазарева. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №17156 от 31.05.2011.

11. Клочков И.А. Модуль геокодирования данных дистанционного зондирования Земли по среднему рельефу местности (панорамная и оптико-электронная съёмка) /В.Г.Андронов, И.А.Клочков, Е.В. Лазарева. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №17157 от 31.05.2011.

12. Клочков И.А. Модуль планово-высотной координатной привязки данных космической панорамной и оптико-электронной съёмки /В.Г.Андронов, И.А.Клочков, Е.В. Лазарева. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №17341 от 26.07.2011.

13. Клочков И.А. Пакет прикладных программ геоорбитального моделирования (космическая панорамная и оптико-электронная съёмка) /В.Г.Андронов, И.А.Клочков, Е.В. Лазарева. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №17395 от 01.09.2011.

Статьи в сборниках статей и конференции

14. Клочков И.А. Программируемые инфокоммуникационные технологии: сборник статей [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков., Е.В. Лазарева // Под ред. В.В. Александрова, В.А. Сарычева. - М.: Радиотехника, вып.1, 2009.- С.33-36.

15. Клочков И.А. Общая модель моноскопических космических изображений в прямой и обратной фотограмметрической задачах [Текст] / В.Г. Андронов, В.Г. Клочков, Е.В. Лазарева //Тезисы доклада Международной научно-технической конференции « Геодезия, картография и кадастр – XXI век». 25-27 мая 2009 года, М.- МИИГАиК.С.148.

16. Клочков И.А. Геокодирование маршрутов космической оптико-электронной съёмки с программным угловым движением КА [Текст] / В.Г. Андронов, И.А. Клочков// Сборник материалов III международной научно-практической конференции «Перспективы развития информационных технологий». Под. Общ. Ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство НГТУ. – 2011г. – часть 1. – С.13-18.

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

18. Клочков И.А. Современное состояние и тенденции развития геоинформационного обеспечения социально-экономической деятельности регионов [Текст] / В.Г.Андронов, И.А.Клочков. // Материалы II региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы инфокоммуникаций». Юго-Зап.гос.ун-т. Курск, 2010.С 71 – 74.

19. Клочков И.А. Основные направления использования результатов космической деятельности в интересах социально-экономического развития регионов Российской Федерации. [Текст] / В.Г.Андронов, И.А.Клочков, Е.В. Лазарева //Материалы II региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы инфокоммуникаций». Юго-Зап.гос.ун-т. Курск, 2010.С.37-40.

20. Клочков И.А. Роль и место ортогеокодированных данных дистанционного зондирования обширных территорий в геоинформационном обеспечении регионов. [Текст] / В.Г.Андронов, И.А.Клочков, Е.В. Лазарева // Материалы II региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы инфокоммуникаций». Юго-Зап.гос.ун-т. Курск, 2010.С. 74-77.

21. Клочков И.А. Ортогеокодирование космических изображений, получаемых в режимах программного сканирования оси визирования в инерциальном пространстве [Текст] / В.Г.Андронов, И.А.Клочков, Е.В. Лазарева // Материалы II региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы инфокоммуникаций». Юго-Зап.гос.ун-т. Курск, 2010.С.87-90.

22. Клочков И.А. Методика макетирования и экспериментальной проверки орбитального метода геокодирования моноскопических маршрутов космических сканерных изображений с использованием ЦМР [Текст] / В.Г. Андронов, А.Н. Борисенко, Волобуев Ю.Н., И.А. Клочков, Е.В. Лазарева// Материалы III региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций». Юго-Зап.гос.ун-т. Курск, 2011.С. 51 - 54

23. Клочков И.А. Структурно-функциональная организация комплекса программ геоорбитального моделирования в задачах регионального геоинформационного обеспечения. [Текст] / В.Г.Андронов, А.Н. Борисенко, Ю.Н. Волобуев, И.А.Клочков, Е.В. Лазарева. // Материалы III региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций». Юго-Зап.гос.ун-т. Курск, 2011.С. 60 – 63.