

На правах рукописи



КОЗЛОВ ОЛЕГ ИГОРЕВИЧ

**Совершенствование методов геодезической привязки сканерных снимков в
целях повышения точности и надежности создания ортофотопланов**

Специальность 25.00.34

«Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия»

Автореферат

Диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК) на кафедре фотограмметрии.

Научный руководитель: **Коршунов Рудольф Алексеевич,**
кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии МИИГАиК.

Официальные оппоненты: **Воронин Евгений Геннадьевич,**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, Филиал Акционерного общества «Ракетно-космический центр «Прогресс» - Научно-производственное предприятие «Оптико-электронные комплексы и системы» (Филиал АО «РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС»), заместитель главного конструктора.

Кадничанский Сергей Алексеевич,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ООО «Геоскан», заместитель генерального директора по аэрофотогеодезии.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных», ФГБУ «Центр геодезии, картографии ИПД».

Защита состоится «17» июня 2021 г. в 17.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.04 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г. Москва, Гороховский переулок, дом 4, МИИГАиК, зал заседаний Ученого совета.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского государственного университета геодезии и картографии» (МИИГАиК):
<http://www.miiigaik.ru/upload/iblock/a37/a374c08e94420e5d3696e9d2d804e8a1.pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

Беленко В. В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время наблюдается высокая востребованность материалов дистанционного зондирования Земли из космоса для решения различных задач науки и производства.

Одним из основных видов геопространственной продукции являются высокоточные цифровые ортофотопланы. Для достижения точности создания ортофотопланов на уровне пространственного разрешения космических снимков необходима точная геодезическая привязка снимков по наземным опорным данным. Технология геодезической привязки космических снимков по опорным точкам местности хорошо отработана. При такой технологии геодезической привязки космических снимков с разрешением 0,5-2,0 метра выполняется по точкам, однозначно дешифрируемым на снимках, в качестве которых используются углы ограждений, бордюры, углы невысоких (2-4 метра) строений, основания скульптурных сооружений, колодцы и т. п. Однако на снимках подлежащих геодезической привязке количество таких точек может оказаться недостаточным. Кроме того, измерение оснований углов высоких заборов или углов строений (которые являются приоритетными опорными точками для привязки космических снимков), даже небольшой высоты, может быть затруднительным при больших углах наклона снимков. В ряде случаев проблема недостаточности опорных данных может быть решена, если в качестве таких данных использовать отрезки линейных объектов (прямолинейные участки дорог, заборы, мосты, дамбы, набережные, бетонные блоки, основания (фундаменты) или края крыш строений, ограждения, трубопроводы, отрезки треков и другие объекты). Исследования по использованию линейных объектов, в качестве альтернативы опорным точкам местности, ведутся отечественными и зарубежными специалистами с конца 70-х годов 20-го века. Этой тематике посвящены работы известных зарубежных (Masry S.E., Lugnani J.B., Hout C.M.A., Tommaselli A.M.G., Venkateswar V и др.) и российских (Погорелов В.В., Коршунов Р.А, Волков В.Ю. и др.) ученых.

Актуальность темы исследований определяется новым подходом к ориентированию сканерных снимков, который заключается в уточнении модели геодезической привязки снимков по известным координатам прямолинейных объектов местности, отображенных на снимке.

Объектом исследования являются методы геодезической привязки космических сканерных изображений.

Предметом исследования являются методы геодезической привязки космических сканерных изображений с использованием линейных объектов местности.

Цели и задачи диссертации. Целью диссертационной работы является совершенствование методов привязки по наземным опорным данным космических сканерных снимков высокого разрешения, используемых для создания ортофотопланов.

Задачами исследований, проведенных в диссертационной работе, являлись:

1. Анализ существующих методов геодезической привязки космических сканерных снимков, выбор и усовершенствование метода геодезической привязки космических снимков по наземным опорным данным с оценкой его точностных возможностей

2. Разработка методики геодезической привязки космических сканерных снимков по линейным объектам (отрезкам прямых линий) и опорным точкам местности.

3. Определение критериев выбора оптимального состава и расположения опорных данных для достижения наилучшего результата геодезической привязки космических сканерных снимков.

4. Анализ точностных характеристик векторных данных (отрезков треков, отрезков линейных объектов и опорных точек местности (ОТМ)), пригодных для использования в качестве опорных, при геодезической привязке космических сканерных снимков.

5. Разработка технологии геодезической привязки космических сканерных снимков с использованием в качестве опорных данных отрезков линейных

объектов, геодезических и навигационных GPS/ГЛОНАСС-треков как отдельно, так и в комбинации с опорными точками местности.

6. Проведение экспериментальных исследований по определению точностных возможностей метода геодезической привязки космических сканерных снимков по отрезкам линейных объектов и отрезкам геодезических и навигационных треков, как отдельно, так и в комбинации с опорными точками местности.

7. Формирование рекомендаций по применению метода геодезической привязки космических сканерных снимков с использованием линейных объектов и опорных точек местности.

Научная новизна. Разработан метод геодезической привязки космических сканерных снимков по векторным данным, позволяющий выполнять геодезическую привязку космических сканерных снимков отечественных и зарубежных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ).

Разработана технология геодезической привязки космических сканерных снимков с использованием опорных векторных данных, позволяющая выполнить точное ориентирование космических снимков в слабоконтурной местности и обеспечивающая сокращение времени на планово-высотную подготовку района работ.

Определены критерии выбора оптимального состава и расположения векторных опорных данных для достижения наилучшего результата геодезической привязки космических сканерных снимков.

Теоретическая и практическая ценность. Предложенный в диссертационной работе метод геодезической привязки космических сканерных снимков по векторным опорным данным, а также разработанные на его основе методика и технология, обеспечивают точность сопоставимую, а в некоторых случаях и превышающую, точность ориентирования снимков по ОТМ.

Разработанная методика ориентирования космических сканерных снимков по векторным данным может быть использована при выполнении производственных работ по созданию ортофопланов.

Использование отрезков ГЛОНАСС/GPS – треков в качестве элементов планово-высотного обоснования для геодезической привязки космических снимков позволит сократить временные и финансовые затраты на выполнение полевых геодезических работ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности:
Диссертация соответствует следующему пункту паспорта специальности 25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия», п.3 теория, технология и технические средства сгущения по аэрокосмическим снимкам геодезических сетей, создания и обновления топографических, землеустроительных, экологических, кадастровых и иных карт и планов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждена проведенными в диссертационной работе экспериментальными исследованиями на статистически значимом количестве данных, в ходе которых предлагаемая методика геодезической привязки космических сканерных снимков с использованием линейных объектов показала результаты сопоставимые по точности с результатами геодезической привязки с применением опорных точек местности, координаты которых определены высокоточными геодезическими способами.

Методы исследования и исходные материалы. При решении поставленных задач использовались методы цифровой фотограмметрической обработки изображений высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, статистические и численные методы. Использовались сканерные космические снимки с отечественных и зарубежных спутников дистанционного зондирования Земли: Ресурс-П, GeoEye, WorldView, Pleiades. Обработка изображений производилась с использованием программного комплекса создания информационных продуктов стандартных уровней обработки ПК «OrtoNormScan», цифровой фотограмметрической системы ЦФС «PHOTOMOD

6.3», а также программного комплекса тематической обработки видовой информации ПК «ТОВИ» и специального программного комплекса геодезической привязки космических сканерных снимков ПК «ГКСС», разработанных в АО «НИИ ТП». Обработка геодезических спутниковых измерений производилась в программном комплексе «Trimble Business Center 3.60».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод геодезической привязки космических сканерных снимков по векторным данным (отрезкам линейных объектов и ОТМ).

2. Технология геодезической привязки космических сканерных снимков с использованием в качестве опорных данных отрезков линейных объектов, геодезических и навигационных GPS/ГЛОНАСС-треков как отдельно, так и в комбинации с опорными точками местности.

3. Критерии выбора отрезков линейных объектов и отрезков навигационных треков для использования их в качестве опорных данных планово-высотной основы.

Реализация и внедрение. Разработанные методика и технология геодезической привязки космических сканерных снимков с использованием в качестве опорных данных отрезков линейных объектов, геодезических и навигационных GPS/ГЛОНАСС-треков как отдельно, так и в комбинации с опорными точками местности реализованы в опытном производстве АО «НИИ ТП» (НПК-12) при создании по материалам космической съемки геопрограммированной продукции.

Апробация работы. По результатам работы были сделаны доклады на Международной научно-технической конференции «Пространственные данные как основа развития экономики России» к 239-летию МИИГАиК (Москва, 2018) и на IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва, 2018).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 научных работ в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК России, 1 статья в журнале,

входящем в международную реферативную базу данных Scopus. Помимо этого, автором работы опубликовано 6 научных статей в изданиях, рекомендованных ВАК России, по тематике 25.00.32 – Геодезия.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы (88 наименований, в том числе 28 на английском языке) и одного приложения. Материал изложен на 142 страницах машинописного текста, содержит 23 таблицы и 45 рисунков.

Личный вклад соискателя. Научные положения, выносимые на защиту, разработаны автором диссертационной работы лично. В научных работах по теме диссертации, в которых соискатель является соавтором, самостоятельно были разработаны: методика геодезической привязки сканерных изображений по векторным данным, технология получения и использования в качестве опорных данных отрезков линейных объектов, отрезков геодезических и навигационных треков. Проведены полевые геодезические работы по измерению координат точек планово-высотной основы.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю работы к.т.н., доценту Р.А. Коршунову и заведующему кафедрой фотограмметрии МИИГАиК, д.т.н., профессору А.Г. Чибуничеву за консультации на всех этапах работы; главному специалисту НПК-12 АО «НИИ ТП» А.Л. Аксену за помощь, поддержку и консультации при проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе предложен новый подход к геодезической привязке космических сканерных снимков с математической моделью в виде RPC полиномов, основанный на уточнении модели по векторным данным.

Методы повышения точности геодезической привязки космических сканерных снимков основаны на определении дополнительных поправок к базовой модели снимков в виде RPC полиномов. Ошибки навигационных данных (в большей степени, это угловые ошибки звездных датчиков и ошибки датчиков

угловых скоростей), входящих в качестве элементов ориентирования в строгую математическую модель снимков, приводят к систематическим ошибкам в модели RPC, которые оптимальным образом описываются аффинными поправками. Для снимков, имеющих малые угловые ошибки ориентации (КА ДЗЗ WorldView, GeoEye) достаточно применить коррекцию геодезической привязки в виде сдвига по координатным осям. В некоторых случаях поправки могут описываться более сложной зависимостью, в качестве которой чаще всего используются полиномы второй степени. Выбор вида математической модели поправок также зависит от количества и равномерности распределения наземных опорных данных, которые используются для определения поправок. При наличии одной опорной точки местности можно выполнить корректирующее координатное преобразование только типа сдвиг. Для применения аффинных преобразований необходимо располагать не менее чем четырьмя ОТМ, расположенным по углам снимка. Если поправки вычисляются при помощи полиномов второй степени, точки должны располагаться обязательно равномерно по всей площади снимка. Не должно быть участков значительной площади, где бы отсутствовали опорные данные.

Требования к количеству и расположению опорных данных усложняет задачу их выбора, которая, в условиях слабоконтурной местности, при традиционном подходе может не иметь решения, т.е. контурные точки местности, которые можно использовать в качестве ОТМ, могут вовсе отсутствовать или их количество и расположение могут быть непригодными для решения задачи геодезической привязки путем определения аффинных или полиномиальных поправок. В связи с этим, задача расширения состава опорных данных представляется актуальной. В качестве дополнения к опорным точкам местности предлагается использовать линейные объекты местности.

Возможность использования в качестве опорных данных линейных объектов рассматривалась и ранее. В работах зарубежных и отечественных авторов описывалось использование линейных объектов для геодезической привязки снимков центральной проекции, модель которых задается уравнениями коллинеарности. За последние десятилетия большое распространение получили

сканерные снимки высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, описываемые строгими моделями. Хорошей аппроксимацией строгой модели для всех типов сканерных снимков являются дробно-рациональные функции RPC. Несмотря на интерес разработчиков, информация о методах повышения точности геодезической привязки космических сканерных снимков, поставляемых с моделями рациональных функций (RPC), по линейным объектам местности отсутствует.

Модель RPC задается соотношениями вида,

$$sample = P_{sample}(B, L, H) = \frac{P_{sample}^1(B, L, H)}{P_{sample}^2(B, L, H)}; \quad (1)$$

$$line = P_{line}(B, L, H) = \frac{P_{line}^1(B, L, H)}{P_{line}^2(B, L, H)},$$

где в числителях и знаменателях стоят полиномы третьей степени, которые связывают нормированные геодезические координаты точки местности В, L, H в общеземной системе координат WGS-84 с нормированными пиксельными координатами, номера столбца (sample), и номера строки (line) ее изображения на снимке.

В зависимости от типа снимка (WorldView, GeoEye, SPOT, Pleiades, Ресурс-П и т.п.), количества и расположения используемых опорных данных применяются линейные поправки (сдвиг), аффинные поправки или полиномиальные поправки.

Поправки типа сдвиг:

$$F_s = s = P_s(B, L, H) + a_0; \quad (2)$$

$$F_l = l = P_l(B, L, H) + b_0,$$

Аффинные поправки:

$$F_s = s = P_s(B, L, H) + a_0 + a_1 \cdot P_s + a_2 \cdot P_l \quad (3)$$

$$F_l = l = P_l(B, L, H) + b_0 + b_1 \cdot P_s + b_2 \cdot P_l ,$$

Полиномиальные поправки (полиномы второй степени):

$$F_s = s = P_s(B, L, H) + a_0 + a_1 \cdot P_s + a_2 \cdot P_l + a_3 \cdot P_s \cdot P_l + a_4 \cdot P_s \cdot P_s + a_5 \cdot P_l \cdot P_l; \quad (4)$$

$$F_l = l = P_l(B, L, H) + b_0 + b_1 \cdot P_s + b_2 \cdot P_l + b_3 \cdot P_s \cdot P_l + b_4 \cdot P_s \cdot P_s + b_5 \cdot P_s \cdot P_s,$$

Предлагаемый метод уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков с использованием линейных объектов основан на том, что

пространственные прямоугольные координаты произвольной точки $T(X, Y, Z)$ отрезка прямой, заданного координатами его концов $T_1(X_1, Y_1, Z_1)$ и $T_2(X_2, Y_2, Z_2)$, удовлетворяют соотношению:

$$t = \frac{X-X_1}{X_2-X_1} = \frac{Y-Y_1}{Y_2-Y_1} = \frac{Z-Z_1}{Z_2-Z_1} \quad (5)$$

Выражение для определения координат произвольной точки отрезка $P(X, Y, Z)$ может быть записано в параметрической форме.

$$\begin{aligned} X &= X_1 + t \cdot (X_2 - X_1) \\ Y &= Y_1 + t \cdot (Y_2 - Y_1) \\ Z &= Z_1 + t \cdot (Z_2 - Z_1) \\ 0 &< t < 1, \end{aligned} \quad (6)$$

Для линейных объектов (отрезков) небольшой протяженности, пространственные прямоугольные координаты X, Y, Z можно заменить геодезическими координатами B, L, H .

Если измерить координаты произвольной точки образа отрезка на снимке и подставить координаты точки (6) в формулы (2), (3), (4), то получим уравнения для определения коэффициентов поправок a_i, b_i и параметра t , определяющего положения точки на отрезке.

После линеаризации уравнений для отрезков и опорных точек получим систему линейных уравнений поправок:

$$Ax + v = B, \quad (7)$$

x – вектор поправок к неизвестным параметрам включающий:

(a_i, b_i) – коэффициенты поправок к RPC;

$t_j, (j=1 \dots n), n$ – количество объектов.

v – невязки уравнений.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_s}{\partial a_0} & \frac{\partial F_s}{\partial a_1} & \frac{\partial F_s}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial F_s}{\partial a_5} & \frac{\partial F_s}{\partial b_0} & \frac{\partial F_s}{\partial b_1} & \frac{\partial F_s}{\partial b_2} & \dots & \frac{\partial F_s}{\partial b_5} & \frac{\partial F_s}{\partial t_1} & \frac{\partial F_s}{\partial t_2} & \dots & \frac{\partial F_s}{\partial t_n} \\ \frac{\partial F_l}{\partial a_0} & \frac{\partial F_l}{\partial a_1} & \frac{\partial F_l}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial F_l}{\partial a_5} & \frac{\partial F_l}{\partial b_0} & \frac{\partial F_l}{\partial b_1} & \frac{\partial F_l}{\partial b_2} & \dots & \frac{\partial F_l}{\partial b_5} & \frac{\partial F_l}{\partial t_1} & \frac{\partial F_l}{\partial t_2} & \dots & \frac{\partial F_l}{\partial t_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_b}{\partial a_0} & \frac{\partial F_b}{\partial a_1} & \frac{\partial F_b}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial F_b}{\partial a_5} & \frac{\partial F_b}{\partial b_0} & \frac{\partial F_b}{\partial b_1} & \frac{\partial F_b}{\partial b_2} & \dots & \frac{\partial F_b}{\partial b_5} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\partial F_i}{\partial a_0} & \frac{\partial F_i}{\partial a_1} & \frac{\partial F_i}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial F_i}{\partial a_5} & \frac{\partial F_i}{\partial b_0} & \frac{\partial F_i}{\partial b_1} & \frac{\partial F_i}{\partial b_2} & \dots & \frac{\partial F_i}{\partial b_5} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$B = \begin{bmatrix} S_{\text{ИЗМ}} - S_{\text{ВЫЧ}} \\ l_{\text{ИЗМ}} - l_{\text{ВЫЧ}} \\ \dots \dots \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $s_{\text{изм}}$ и $l_{\text{изм}}$ измеренные координаты точки объекта на снимке, а $s_{\text{выч}}$ и $l_{\text{выч}}$ вычисленные координаты опорной точки или объекта по приближенным значениям параметров по формулам (2,3,4).

В матрице (8) в первом столбце даны производные для поправок типа «сдвиг», в 1-3 столбцах производные для аффинных поправок, далее идут производные для полиномиальных поправок и параметра t , определяющего положение точки на отрезке. В верхней части матрицы «А» даны частные производные функций F_s и F_l при использовании для геодезической привязки отрезков линейных объектов. В нижней части матрицы «А» даны частные производные функций F_s и F_l при использовании для геодезической привязки опорных точек местности. Решение выполняется методом последовательных приближений по способу наименьших квадратов.

Особенность подхода, предполагающего использование для уточнения геодезической привязки отрезков линейных объектов, заключается в том, что измеряемая точка не является фиксированной, как в случае использования ОТМ. Это может быть любая точка, принадлежащая отрезку.

Выводы по первому разделу.

Проанализированы современные научные работы по теме исследований. Описан математический аппарат задачи уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков по линейным объектам. Сделаны выводы о возможности использования линейных объектов для повышения точности геодезической привязки космических сканерных снимков высокого разрешения.

Во втором разделе изложена методика повышения надежности и точности геодезической привязки космических сканерных снимков путем использования в качестве элементов планово-высотной основы набора векторных данных, состоящего из опорных точек местности, линейных объектов и отрезков навигационных треков.

Навигационные треки – зафиксированная навигационным оборудованием последовательность точек, содержащих информацию о текущем местоположении, высоте и времени, которая отражает пройденный путь. В качестве границ отрезка

трека принимаются соседние точки, зафиксированные навигационным оборудованием. Треки записываются геодезическим спутниковым приемником (точность 0,3м) или бытовым авто-навигатором (точность 1-3 м). Редуцирование координат точек трека, изначально расположенных на фиксированном расстоянии от границ дорожного полотна, на обочину дороги, позволяет использовать для геодезической привязки снимков отрезки, расположенные непосредственно на обочине дороги. (Подробно методика использования треков для геодезической привязки космических сканерных снимков приведена во втором разделе диссертационной работы).

Математический аппарат предложенного подхода к уточнению геодезической привязки космических сканерных снимков позволяет использовать в качестве опорных данных отрезки линейных объектов, треков и опорные точки местности как раздельно, так и совместно.

При выборе линейных объектов местности обязательным условием выбора объекта является уверенное распознавание его на снимке и возможность измерения координат точек объекта с пиксельной точностью на видимой части отрезка. Выбор длины отрезка линейного объекта на местности определяется возможностью описания его уравнением прямой линии.

При разработке методики рассматривалось два способа определения координат крайних точек отрезков: геодезический и картографический.

Геодезический способ основан на использовании навигационных сигналов GPS/ГЛОНАСС и подразумевает измерение координат в статическом и кинематическом режиме. Статический способ (точность 0,05м) применяют при определении крайних точек отрезков линейных объектов. Кинематический способ (точность 0,3м) используется при записи навигационных треков.

При применении картографического способа плановые координаты получают с крупномасштабных (1:1000 – 1:5000) картографических материалов, а затем по данным цифровых моделей рельефа определяются высоты.

Экспериментальная апробация методики выполнялась с использованием экспериментального программного обеспечения геодезической привязки

космических сканерных снимков по векторным данным (ПК «ГКСС» АФЕК.13256-01), разработанным в АО «НИИ ТП», и ЦФС «Photomod». В ЦФС «Photomod» выполнялось измерение и ортотрансформирование снимков.

В ходе экспериментов исследовалась точность геодезической привязки космических снимков (WorldView, GeoEye, SPOT, Pleiades, Ресурс-П) с использованием полного набора векторных данных (ОТМ, отрезки линейных объектов и треков). Координаты опорных (контрольных) точек местности измерялись высокоточным спутниковым оборудованием. Координаты граничных точек линейных объектов снимались с ортофотопланов, созданным по снимкам WorldView с точностью 1 м. Координаты концов отрезков треков получены навигационным оборудованием.

При решении задачи геодезической привязки космических сканерных снимков по векторным данным необходимо, чтобы количество уравнений в системе уравнений поправок, составленных с их использованием, превышало количество определяемых параметров. Таким образом, количество уравнений поправок должно превышать количество неизвестных и определяться соотношением:

$$2 \cdot (K_{\text{отр}} + K_{\text{отм}}) > n_{a,b} + n_t, \quad (10)$$

где:

$n_{a,b}$ – количество параметров a_i, b_i ;

n_t – количество параметров $t_j, j=1, K_{\text{отр}}$;

$K_{\text{отр}}$ – количество отрезков линейных объектов и треков;

$K_{\text{отм}}$ – количество опорных точек.

Если $n_{a,b} = 2$ используются поправки типа «сдвиг»,

$n_{a,b} = 6$ – аффинные поправки,

$n_{a,b} = 12$ – полиномиальные поправки.

Приведем один из примеров исследований геодезической привязки космических сканерных снимков – ориентирование снимка КА ДЗЗ «Ресурс-П» (разрешение 0,8 метра) на территорию Дмитровского района

Московской области по отрезкам треков. Первичная точность (СКО) геодезической привязки снимка, обеспечиваемая моделью в виде RPC, составила 9 метров.

На местности геодезическим спутниковым оборудованием было измерено 12 опорных точек местности и записаны треки. Затем были выбраны 19 отрезков треков равномерно расположенных на территории покрывающей изображение снимка на местности с учетом их хаотичной направленности (См. рис. 1).

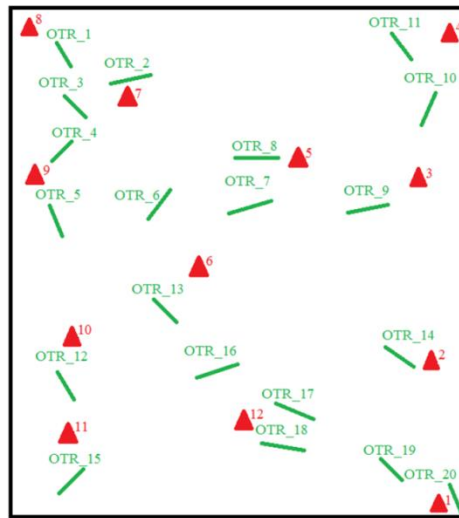


Рисунок 1 - Схема расположения отрезков треков и ОТМ на снимке

Было выполнено уточнение RPC-модели с использованием 19 отрезков путем вычисления аффинных поправок. СКО на контрольных точках, в качестве которых использовались ОТМ, составило 1,4 пиксель. Затем было выполнено ориентирование снимка по 12 ОТМ и 19 отрезкам треков. Точность геодезической привязки составила 0,8 пиксель.

В целях определения минимально допустимого количества отрезков и ОТМ при их совместном использовании для вычисления аффинных поправок были выполнены экспериментальные исследования.

Схемы расположения точек и отрезков линейных объектов (отрезков треков) приведены на рисунках 2 (а-д).

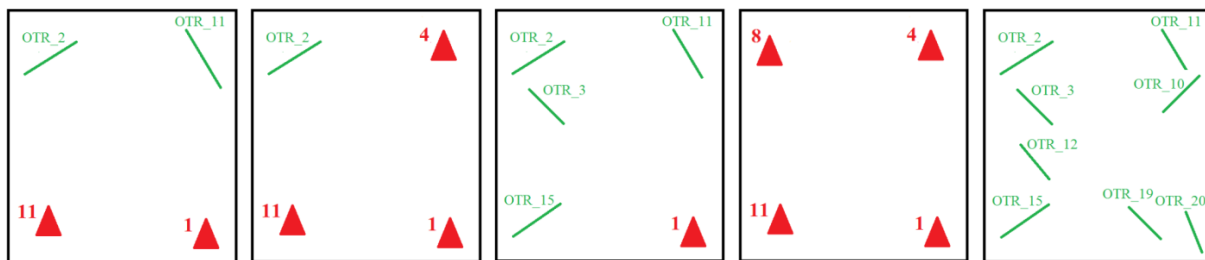


Рис.2а

Рис.2б

Рис.2в

Рис.2г

Рис.2д

Рисунки 2 (а-д) - Схемы расположения опорных точек и отрезков треков

Результаты оценки точности геодезической привязки снимка по опорным данным, отмеченным на рисунках 2 (а-д), полученные с использованием контрольных точек приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Оценка точности геодезической привязки по контрольным точкам

	Рис.2а		Рис.2б		Рис.2в		Рис.2г		Рис.2д	
СКО _{xy} (пиксель/м)	1,09п	0,87м	1,16п	0,93м	1,49п	1,17м	1,31п	1,05м	1,69п	1,35м

Результаты апробации разработанной методики подтвердили ее работоспособность.

В ходе экспериментальной проверки методики было установлено, что точность решения задачи геодезической привязки космических снимков с использованием в качестве опорных данных отрезков линейных объектов и треков зависит не только от их количества и распределения по полю снимка, но и от их взаимного расположения. Экспериментальным путем было установлено, что отрезки линейных объектов и треков, участвующие в решении задачи уточнения геодезической привязки космических снимков, должны иметь разные направления, при этом максимальный угол между направлениями не должен быть меньше 10° градусов при отсутствии ОТМ.

Установлено, что предлагаемая методика геодезической привязки космических сканерных снимков с моделью в виде RPC полиномов, позволяет определять высоты зданий в процессе ориентирования снимков с использованием отрезков линейных объектов, в качестве которых используются грани домов. Если

выполнять измерение точки грани здания, которая находится на крыши дома, высота здания определится по формуле:

$$H = H_1 + t \cdot (H_2 - H_1), \quad (11)$$

Где H_1 - высота точки у основания здания, H_2 может быть задана произвольным значением, например 50 метров. Значения параметра t определяется в процессе решения системы уравнений (6).

Выводы по второму разделу.

Разработанная методика уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков позволяет выполнять геодезическую привязку зарубежных и отечественных снимков с использованием опорных векторных данных.

Использование сочетания векторных опорных данных повышает надежность и точность геодезической привязки космических сканерных снимков и позволяет сократить количество опорных точек местности, а, в некоторых случаях, с учетом геометрии расположения линейных объектов, полностью заменить их.

В третьем разделе изложены основные положения разработанной технологии уточнения геодезической привязки космических снимков с использованием опорных точек местности, отрезков треков и отрезков линейных объектов.

Исходными материалами являются космические сканерные снимки высокого разрешения. Опорными данными являются элементы планово-высотной основы, состоящие из ОТМ, линейных объектов местности и отрезков навигационных треков.

Технологический процесс требует использования не менее двух программных комплексов - ЦФС «Photomod» и программного комплекса геодезической привязки космических сканерных снимков по векторным данным (ПК «ГКСС»). В ЦФС «Photomod» производится измерение снимков и создание ортофотопланов. Вместо ЦФС «Photomod» можно использовать ПО «ТОВИ», разработанное в АО «НИИ ТП».

ПК «ГКСС» обеспечивает:

- загрузку, формирование и редактирование опорных данных;
- геодезическую привязку снимков с использованием векторных данных, в процессе которой выполняется определение поправок к RPC.
- определение геодезических координат точек отрезков линейных объектов измеренных на снимке по формулам (6);
- экспорт измеренных и геодезических координат опорных точек и вычисленных координат отрезков линейных объектов вместе с их координатами, измеренными на снимке в формате RAT-B для загрузки в проект ЦФС «Photomod»;
- расчет углов между направлениями, образованными линейными объектами;
- графическое отображение векторных опорных данных.

Этапы технологии:

1. Анализ исходных снимков и создание проекта планово-высотной основы снимка. На этапе создания проекта, на снимке выбирают прямолинейные объекты местности, ОТМ, а также оптимальные маршруты для записи треков, пригодные для использования в качестве опорных данных.
2. Построение цифровой модели рельефа (ЦМР) в ЦФС «Photomod».
3. Полевые работы по определению координат ОТМ, крайних точек отрезков линейных объектов, запись треков. Камеральные работы по определению координат и высот векторных опорных данных по крупномасштабным картографическим материалам и ЦМР.
4. Создание проекта геодезической привязки снимка в ПК «ГКСС» и загрузка файла RPC.
5. Загрузка в проект ПК «ГКСС» координат ОТМ и координат точек линейных объектов и треков в проекции UTM.
6. Редукция точек отрезков треков на обочину дороги в ПК «ГКСС». Формирование файлов точек линейных объектов и треков, предназначенных для измерения на снимке в ЦФС «Photomod».

7. Создание проекта ЦФС «Photomod» в проекции UTM. Загрузка в проект ЦФС «Photomod» космических снимков и координат OTM.

8. Измерение пиксельных координат OTM на снимке в проекте ЦФС «Photomod». Измерение произвольной точки на видимой части линейного объекта на снимке. Измерение точек отрезков треков на обочине дороги.

9. Экспорт геодезических и измеренных координат OTM, точек линейных отрезков в формате РАТ-В ЦФС «Photomod».

10. Импорт измерений из формата РАТ-В ЦФС «Photomod» в проект ПК «ГКСС» и формирование файла OTM, координат точек линейных отрезков во внутреннем формате ПК «ГКСС».

11. Ориентирование снимка в проекте ПК «ГКСС». Определение поправок к RPC. Вычисление геодезических координат точек линейных отрезков, измеренных на снимке в ЦФС «Photomod».

12. Экспорт измеренных и геодезических координат OTM и координат точек линейных объектов из ПК «ГКСС» в формате РАТ-В ЦФС «Photomod». Загрузка сформированных файлов опорных данных в проект ЦФС «Photomod».

13. Ориентирование снимка в ЦФС «Photomod» с вычислением поправок типа «сдвиг» или аффинных поправок.

14. Загрузка ЦМР в ЦФС «Photomod».

15. Изготовление ортофотоплана в ЦФС «Photomod».

Примечание: в случае использования полиномиальных поправок в ПК «ГКСС», процесс ортотрансформирования выполняется в ПО «ТОВИ», разработанном в АО «НИИ ТП».

Схема технологического процесса изготовления ортофотопланов с использованием программных комплексов ЦФС «Photomod», ПК «ГКСС» и ПО «ТОВИ», представлена на рисунке 3.

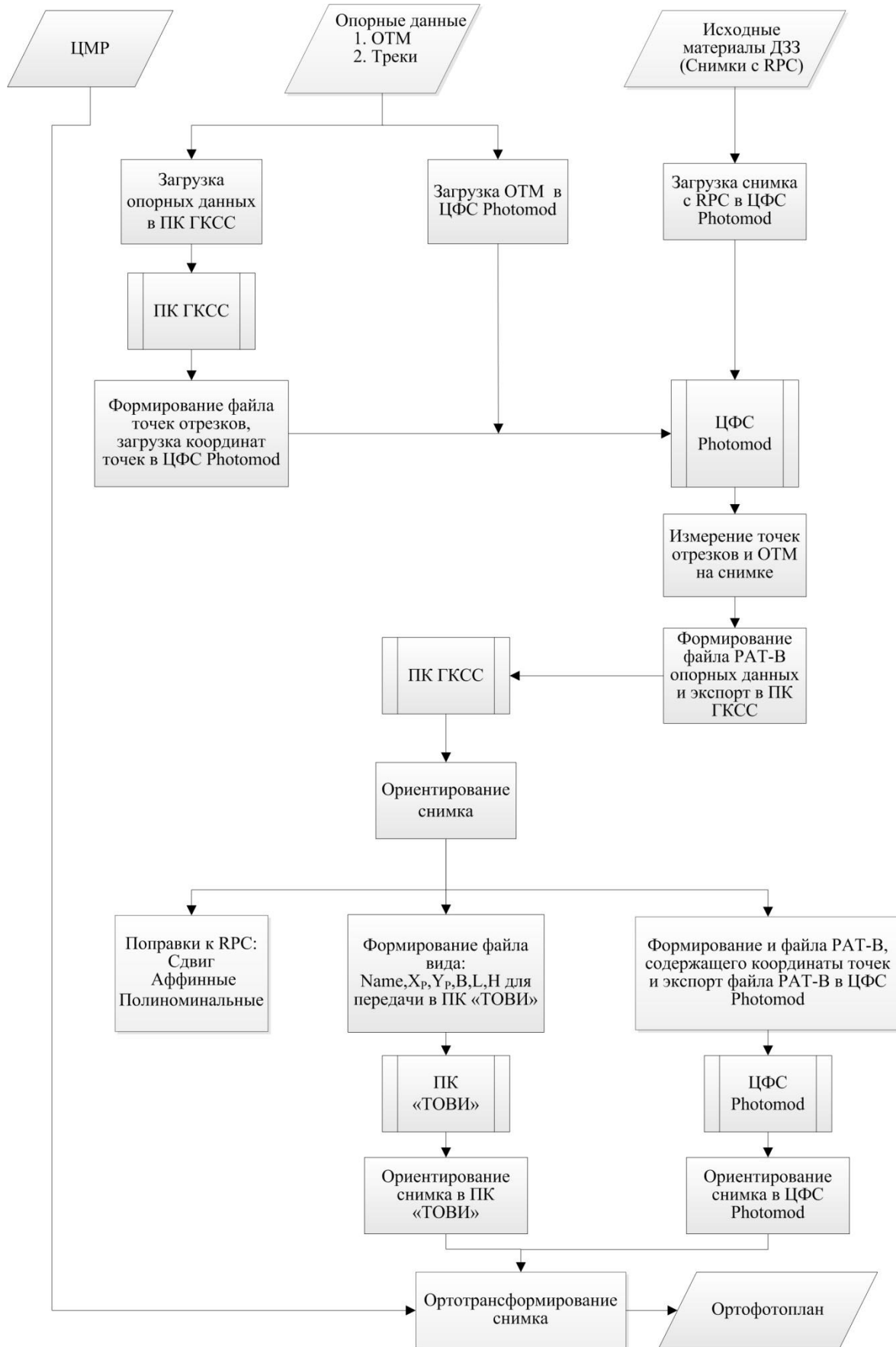


Рисунок 3 - Схема технологического процесса

Для практической апробации разработанной технологии исследовалась возможность геодезической привязки космических снимков высокого разрешения Ресурс-П с использованием в качестве опорных данных опорных точек местности и отрезков треков. Для этого в рамках производственной ОКР был отобран снимок «Ресурс-П» (уровень обработки 2А) размером 40x40 км на территорию Ивановской области с разрешением 0,8м. Первичная точность (СКО) геодезической привязки снимка, обеспечиваемая моделью в виде RPC, составила 13 метров. Геодезическим спутниковым оборудованием в статическом дифференциальном режиме было измерено 6 опорных точек местности. Также, в кинематическом, дифференциальном режиме были записаны траектории движения автомобиля - треки (см. рисунок 4). Регистрация треков выполнялась при движении автомобиля с антенной, закрепленной с правой стороны крыши автомобиля. В дальнейшем измерения были редуцированы на обочину дороги, для точной идентификации отрезков на снимке. Из записанных треков было выбрано 8 отрезков.

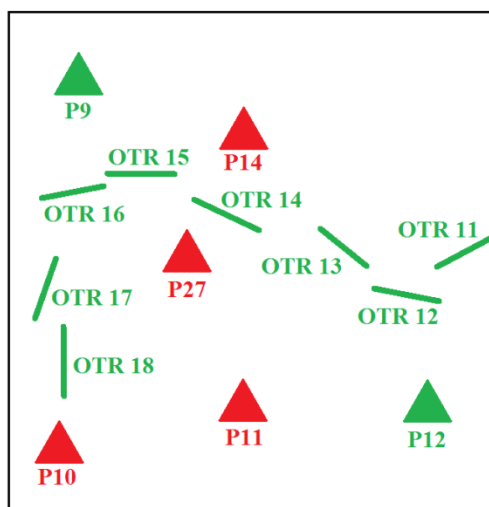


Рисунок 4 - Схема расположения отрезков треков, ОТМ (зеленые отрезки и треугольники) и контрольных точек (красные треугольники) на снимке

В ПК «ГКСС» было выполнено ориентирование снимка и контроль точности. Участвовали все 8 отрезков и 2 ОТМ (P9, P12). Точность геодезической привязки составила 0,5 пиксель. СКО на контрольных точках (P10, P11, P14, P27) 1,2 пиксель.

В ЦФС «Photomod» был создан ортофотоплан и выполнена оценка его точности ПО Global Mapper. Результаты оценки точности приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Расхождения координат ОТМ, полученных из GPS-измерений и измеренных на ортофотоплане, созданном с использованием разработанной технологии геодезической привязки снимков

ID точки	Координаты (X, Y), (м), GPS	Координаты (X, Y), (м), Ортофотоплан	Расхождения, ΔX (м), ΔY (м)	Расхождения, ΔXY , (м)
P9	595570,225 6264520,626	595571,025 6264520,821	-0,800 -0,195	0,823
P10	587033,577 6227234,701	587032,69 6227235,378	0,887 -0,677	1,116
P11	606412,854 6226927,275	606412,062 6226927,608	0,792 -0,333	0,859
P12	623640,953 6228747,838	623640,152 6228748,834	0,801 -0,996	1,278
P14	613772,423 6261710,387	613773,072 6261710,946	-0,649 -0,559	0,857
P27	604674,013 6245172,664	604673,823 6245173,501	0,190 -0,837	0,837

Из анализа данных, приведенных в таблице 1, видно, что расхождения координат ОТМ, измеренных на ортофотоплане, созданном с использованием векторных данных, с координатами, измеренными высокоточным GPS-оборудованием, не превышают 1,3 м.

Выводы по третьему разделу

Показаны преимущества совместного использования опорных точек и отрезков, являющихся частями линейных объектов или навигационных треков для решения задачи ориентирования космических сканерных снимков.

Основными преимуществами предложенных методов ориентирования космических сканерных снимков являются:

- оперативность получения данных для планово-высотной основы, в случае использования треков;

- улучшение точности геодезической привязки снимков при использовании отрезков линейных объектов;

- увеличение состава исходных данных при ориентировании малоинформативных снимков, следовательно, повышение точности и надежности создания ортофотопланов.

Заключение

Целью работы являлось совершенствование методов и повышение точности геодезической привязки по наземным опорным данным космических сканерных снимков высокого разрешения, используемых для создания ортофотопланов.

В ходе исследований разработан метод уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков по линейным объектам (отрезками пространственных прямых линий), определяемых по их координатам, измеренным на местности. Выполнена экспериментальная проверка методики с оценкой точности полученных решений на контрольных данных, показавшая возможность выполнения геодезической привязки космических сканерных снимков высокого разрешения с точностями достаточными для создания ортофотопланов масштаба 1:10000.

Разработанная в диссертации технология, позволяет выполнять геодезическую привязку космических сканерных изображений с использованием треков, записанных геодезическим оборудованием, с точность 1-2 пиксель.

Экспериментальная проверка технологии на реальных данных показала ее эффективность в условиях недостаточного количества контурных точек и возможность значительного сокращения затрат времени на планово-высотную подготовку снимков.

Основными достоинствами разработанной методики и технологии являются:

- оперативность получения данных для планово-высотной основы, в случае использования треков;
- повышения точности геодезической привязки космических снимков при использовании отрезков линейных объектов;
- расширение состава опорных данных при ориентировании малоинформативных снимков.

Перспективы развития разработанной технологии

Использование отрезков линейных объектов в качестве опорных данных при уточнении геодезической привязки космических изображений с моделью в виде RPC расширяет состав опорных данных и, как следствие, возможности технологии уточнения геодезической привязки. Однако и в этом случае остаются ограничения на выбор объектов местности, которые можно использовать в качестве опорных. Дальнейшее расширение состава опорных данных возможно за счет использования нелинейных объектов. На местности в качестве таких объектов могут использоваться объекты круглой формы - клумбы, бассейны, дорожная разметка в местах организации кругового движения и т. п., а также изгибы дорог, рек, ограждений и т. п.

Список публикаций автора по теме диссертации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Аксенов А.Л., Козлов О.И. Способ геодезической привязки космических сканерных снимков / А.Л. Аксенов, О.И. Козлов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2018. – Т. 62. – № 3. – С. 277-282.

2. Аксенов А.Л., Козлов О.И. Навигационные треки как альтернатива планово-высотной основы / А.Л. Аксенов, О.И. Козлов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2018. – Т. 62. – № 6. – С. 624-631.

3. Аксенов А.Л., Козлов О.И. Развитие методов ориентирования космических сканерных снимков / А.Л. Аксенов, О.И. Козлов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2019. – Т. 63. – № 3. – С. 282-291.

4. Аксенов А.Л., Козлов О.И. Практическое применение метода геодезической привязки снимка с использованием линейных объектов / А.Л. Аксенов, О.И. Козлов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2020. – Т. 64. – № 1. – С. 38-44.

5. Аксенов А.Л., Козлов О.И. Ориентирование аэрокосмических снимков с использованием объектов местности / А.Л. Аксенов, О.И. Козлов // Геодезия и картография. – 2020. – № 11. – С. 20-28.