

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ
(МИИГАиК)

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»

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
канд. техн. наук,
доц. Коршунов Р.А.

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1. Математические модели геодезической привязки космических сканерных снимков	10
1.1 Математические модели космических сканерных снимков, для геодезической привязки	13
1.1.1 Строгая модель съёмочной системы	14
1.1.2 Универсальная модель сканерной съёмки	17
1.1.3 Модель в виде рациональных полиномов	19
1.2 Математические модели уточнения геодезической привязки сканерных снимков с RPC	22
1.2.1 Линейное смещение	23
1.2.2 Аффинные преобразования	23
1.2.3 Полиномиальные преобразования	24
1.3 Использование линейных объектов при уточнении геодезической привязки сканерных снимков	25
Выводы по первому разделу	30
РАЗДЕЛ 2. Методика уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков по отрезкам прямых	31
2.1 Математическая основа методики уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков по отрезкам прямых	31
2.2 Условия применения метода уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков по отрезкам прямых	35
2.2.1 Выбор вида преобразований, дополняющих RPC	35
2.2.2 Требования к составу и точности опорных данных	38
2.2.3 Требования к распределению опорных данных по площади снимка	43
2.2.4 Ориентирование космических сканерных снимков по трекам	45
2.2.5 Определение условий применения треков в качестве опорных данных при уточнении геодезической привязки космических снимков	46

2.3	Определение координат линейных объектов	54
2.3.1	Определение координат линейных объектов на снимке.....	54
2.3.2	Определение координат линейных объектов на местности	55
2.3.3	Оценка точности полученного решения на контрольных точках.....	56
2.4	Экспериментальная проверка основных положений методики геодезической привязки снимков по отрезкам линейных объектов.....	57
2.5	Экспериментальная проверка технологии при использовании треков и опорных точек местности.....	67
2.5.1	Уточнение геодезической привязки космического снимка КА ДЗЗ Ресурс-П по отрезкам геодезических треков	75
2.5.2	Уточнение геодезической привязки космического снимка КА ДЗЗ «Ресурс-П» по отрезкам навигационных треков	79
2.5.3	Оценка влияния состава опорных данных на точность геодезической привязки.....	82
2.6	Оценка экономической эффективности технологии планово-высотной подготовки с использованием линейных объектов	85
	Выводы по второму разделу	87
	РАЗДЕЛ 3. Технология повышения точности геодезической привязки космических снимков по опорным данным	89
3.1	Описание технологии.....	89
3.2	Перспективы развития разработанной технологии	98
	Выводы по третьему разделу	105
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	109
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	110
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	120

ВВЕДЕНИЕ

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 [42, 49, 56]. Технология геодезической привязки космических снимков по опорным точкам местности хорошо отработана. При такой технологии геодезическая привязка 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, 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.V., Hout C.M.A,

Tommaselli A.M.G., Venkateswar V и др.) [72, 74, 76, 83, 84] и российских (Погорелов В.В., Коршунов Р.А, Гомозов О.А. и др.) [9, 20, 33] 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 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 точек местности, отрезков линейных объектов, отрезков геодезических и навигационных ГЛОНАСС/GPS - треков, 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.

Выполнено экспериментальное подтверждение работоспособности методики и технологии геодезической привязки космических снимков по векторным данным.

Теоретическая и практическая ценность. В диссертационной работе предлагается развитие теории геодезической привязки аэрокосмических снимков по опорным данным, состоящих из опорных точек местности, описанной в научных работах отечественных и зарубежных ученых. Методика, изложенная в диссертации, позволяет расширить состав опорных данных, в которые, наряду с опорными точками местности, входят отрезки линейных объектов и отрезки треков.

Обосновано применение математических методов определения параметров аффинных и полиномиальных преобразований, дополняющих модели геодезической привязки космических снимков, по векторным данным, представленным в параметрическом виде. Предложенный в диссертационной работе метод геодезической привязки космических сканерных снимков по векторным опорным данным и разработанные на его основе, методика и технология, обеспечивают точность сопоставимую, а в некоторых случаях и превышающую, точность геодезической привязки космических снимков по ОТМ. Теоретические методы, изложенные в данной работе, можно адаптировать к методике геодезической привязки аэрокосмических снимков по нелинейным объектам местности. Разработанная методика ориентирования космических сканерных снимков по линейным объектам, отрезкам треков и ОТМ может быть использована при выполнении производственных работ по созданию ортофопланов.

Использование отрезков ГНСС-треков в качестве элементов планово-высотного обоснования для геодезической привязки космических снимков позволит сократить затраты времени и финансовых затрат на выполнение полевых геодезических работ.

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 сертифицированном 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 геопространственной 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.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю работы канд. техн. наук, доценту Р.А. Коршунову и заведующему кафедрой фотограмметрии МИИГАиК, д-р техн. наук, профессору А.Г. Чибуничеву за консультации на всех этапах работы; главному специалисту НПК-12 АО «НИИ ТП» А.Л. Аксенову за помощь, поддержку и консультации при проведении исследований, постановке экспериментов и оценке их результатов.

РАЗДЕЛ 1. Математические модели геодезической привязки космических сканерных снимков

В настоящее время наблюдается высокая востребованность материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса для решения различных задач науки и производства. Главными преимуществами ДЗЗ являются:

- охват больших и труднодоступных территорий;
- оперативность получения информации;
- мультиспектральная съемка.

Космические снимки можно классифицировать по нескольким признакам, основными из которых являются следующие:

А) Спектральный диапазон:

- видимый и ближний инфракрасный (световой) диапазон;
- тепловой инфракрасный диапазон;
- радиодиапазон.

Б) Степень обзора:

- глобальные (охватывающие всю планету);
- региональные, на которых отображаются части материков;
- локальные, на которых отображаются части регионов.

В) Пространственное разрешение (минимальная линейная величина объектов местности, изображающихся на снимке):

- низкое разрешение (километры);
- среднее разрешение (сотни метров);
- высокое разрешения (десятки метров);
- сверхвысокого разрешения (единицы метров и менее).

Отдельно следует выделить космические снимки высокого и сверхвысокого разрешения, которые предоставляют потребителям разнообразную информацию, позволяющую решать многочисленные практические задачи:

- создание и обновление топографических и кадастровых карт;
- топографический мониторинг изменений местности;
- гидрометеорологические наблюдения с целью получения данных о снежно-ледовом покрывах, полях температуры и влагосодержания атмосферы, температуре и других физико-химических параметрах поверхности Земли, зонах и интенсивности осадков, изменении береговой линии и т. п.;
- экологический мониторинг для оценки загрязненности атмосферы, земной поверхности, водной среды, поиск и оценка площадей и объемов свалок промышленных и бытовых отходов;
- мониторинг чрезвычайных ситуаций, обнаружение и оценка масштабов и характера разрушений, прогнозирование последствий разрушительных природных явлений, лесных пожарах, разливах нефтепродуктов и т. д.;
- топографическое обеспечение инженерных изысканий, геофизических и геологоразведочных работ, сейсмографических и гидрологических исследований.

Среди этих задач выделяется круг задач, для решения которых требуется наивысшая детальность и точность космических снимков:

- крупномасштабное картографирование территорий;
- построение детальных цифровых моделей рельефа и трехмерных моделей местности;
- проектирование крупномасштабных инженерно-технических сооружений;
- ведение земельного кадастра и другие.

В таблице 1.1 приведены данные об уровне пространственного разрешения современных космических аппаратов ДЗЗ. На сегодняшний день достигнуто разрешение на уровне 0,3 м [69, 73, 79]. Однако снимки с таким разрешением имеют ограниченное распространение. В то время как снимки с разрешением 0,5 – 0,7 м широко применяются на практике.

Таблица 1.1 - Характеристики современных космических аппаратов ДЗЗ

Название	Пространственное разрешение, м	Точность геопозиционирования, м
Ресурс-П (РФ)	1	3,1-21
WorldView-2 (США)	0,46	5
WorldView-3 (США)	0,31	3,5
WorldView-4 (США)	0,30	3
SPOT-6,7 (Франция, Индия)	2,00	10
PLEIADES-1A, 1B(Франция)	0,50	4,5
TH-1,2 (Китай)	2,00	25
BlackSky (США)	1,00	10
GeoEye-1 (США)	0,41	2,5
Ikonos (США)	0,82	23
Jilin-1 (Китай)	0,72	<200
Mohammed VI A, B (Франция)	0,70	4,5
QuickBird (США)	0,61	23
SuperView-1 (Китай)	0,50	20
Cartosat-3 (Индия)	0,28	-

Такие снимки могут использоваться при создании ортофотопланов, служащих основой для создания крупномасштабных топографических карт и планов [11]. По своим характеристикам космические снимки с разрешением 0,5 м и лучше могут использоваться для создания ортофотопланов масштаба 1:10000, а снимки с разрешением 0,5 - 2,0 м для создания ортофотопланов, применяемых при обновлении топографических карт масштаба 1:25000 [59]. Но пространственное разрешение снимков не единственная характеристика, определяющая их пригодность для создания ортофотопланов. Космические снимки, используемые при создании ортофотопланов должны быть точно сориентированы в геодезическом отношении. Геодезическое ориентирование космических снимков по бортовым данным, выполняемое поставщиками космических снимков, не обеспечивает требуемой точности (Таблица 1). Под высокой точностью геодезической привязки космических снимков понимается

точность соизмеримая с их разрешением. Космические снимки, используемые в этих целях крупномасштабного картографирования, должны быть сориентированы с точностью, заданной действующими нормативно-техническими документами [25, 26]. Так, при создании ортофотопланов масштаба 1:10000 точность (средняя квадратическая ошибка) ориентирования (геодезической привязки) снимков должна быть не хуже 1,5 м. На сегодняшний день такая точность ориентирования космических снимков достигается лишь при использовании наземных опорных данных.

Для получения космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения в космических аппаратах ДЗЗ наиболее часто используются мультиспектральные оптико-механические съемочные системы сканерного типа. Сканерные снимки формируются из фрагментов изображений, получаемых от одного или нескольких оптико-электронных преобразователей, расположенных в фокальной плоскости оптической системы. На стадии обработки первичных материалов съемки из этих фрагментов получают единое изображение (сканерный снимок) с геодезической привязкой, линейные и угловые параметры которой определяются по данным бортовых измерителей. Вследствие того, что геометрия сканерных снимков отличается от геометрии снимков центральной проекции, их обработка требует применения специальных методов, выбор которых определяется видом математической модели, описывающей зависимость между координатами объекта на снимке и на местности [6, 57, 79, 80].

1.1 Математические модели космических сканерных снимков, для геодезической привязки

Основными видами математических моделей, устанавливающих связь между координатами объекта на снимке и на местности, являются:

- строгие модели съемочных систем, описывающие конструктивные особенности съемочной системы и ее положение в пространстве во время съемки;

- универсальные модели сканерной съемки, применимой к сканерным съемочным системам любого типа;

- модели, основанные на использовании рациональных полиномов.

Для построения и применения этих моделей требуется разный состав исходных данных, но во всех случаях эти данные являются либо данными бортовых измерителей, либо наземными опорными данными [7, 41].

1.1.1 Строгая модель съемочной системы

Строгие модели съемочных систем являются, по сути, физическими моделями, поскольку при их построении используются данные о конструкции конкретной съемочной системы (фокусное расстояние оптической системы, расположение сенсоров в фокальной плоскости, параметры дисторсии и др.), а также данные бортовых измерителей (аппаратуры спутниковой навигации, астродатчиков, инерциальных измерителей, синхронизирующего устройства и др.), описывающие положение съемочной системы и ее пространственную ориентацию во время съемки [6, 15, 40, 54, 79]. Строгие модели съемочных систем обеспечивают решение прямой фотограмметрической задачи, то есть устанавливают связь пиксельных координат изображения (сканерного снимка) с пространственными координатами объектов местности, определяемыми в месте пересечения проектирующих лучей с эллипсоидом или физической поверхностью Земли (при наличии ЦМР) [55].

Суть построения строгих моделей съемочных систем заключается в восстановлении пространственного положения совокупности лучей сформировавших снимок, то есть элементов внутреннего и внешнего ориентирования каждого пикселя снимка. Строгие модели включают в себя математические модели, описывающие конструкцию (геометрию) съемочной системы, движение съемочной системы по орбите относительно центра масс Земли, положение оптической оси в инерциальной системе координат, геометрию и собственное движение Земли.

Разработчики КА ДЗЗ по-разному представляют такие модели, но в общем виде связь между геодезическими координатами объекта местности и координатами его изображения на снимке можно описать следующим соотношением:

$$\begin{aligned} B &= F_B(s, l, M[X, Y, Z], R[\varphi, \omega, \chi], S, P_c); \\ L &= F_L(s, l, M[X, Y, Z], R[\varphi, \omega, \chi], S, P_c), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где: s, l – пиксельные координаты объекта, изображенного на снимке;

B, L – геодезические координаты объекта на местности;

$[X, Y, Z]$ – пространственные координаты съёмочной системы на момент времени t , соответствующий моменту формирования изображения пикселя с координатами (s, l) ;

$[\varphi, \omega, \chi]$ – угловые элементы, описывающие пространственную ориентацию оптической оси съёмочной системы на момент съёмки;

S – математическая модель Земли;

P_c – параметры оптической системы.

Параметры, определяющие положение съёмочной системы $M[X, Y, Z]$ и ее пространственную ориентацию $R[\varphi, \omega, \chi]$ в момент съёмки, получают из измерений, выполненных бортовыми датчиками: аппаратурой спутниковой навигации (ГНСС аппаратурой), приборами астроориентации и инерциальными датчиками (датчиками угловых скоростей).

В состав математической модели Земли (S) входят параметры отсчетного эллипсоида (большая полуось, сжатие), цифровая модель рельефа земной поверхности (при наличии), параметры вращения Земли и движения полюса, параметры связи общеземной и инерциальной систем координат (параметры прецессии, нутации).

Параметры оптической системы включают элементы внутреннего ориентирования (фокусное расстояние, положение главной точки) и параметры дисторсии.

Важным моментом при построении строгой модели съёмочной системы является приведение всех изменяющихся во времени параметров к моменту

формирования каждого пикселя изображения. В этих целях используется бортовое синхронизирующее устройство, показания которого кроме решения задачи синхронизации бортовых измерений позволяет установить связь шкалы бортового времени со шкалой всемирного времени. Эта связь необходима для корректного учета вращения Земли и изменения ее положения в инерциальной системе координат.

Функциональная зависимость, устанавливающая связь между пиксельными координатами на изображении (s, l) и пространственными координатами на местности (X, Y, Z), имеет вид [80]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} + m \cdot R(\varphi, \omega, \chi) \cdot \begin{bmatrix} s - x_p \\ l - y_p \\ -f \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

где X, Y, Z – координаты объекта местности в земной системе координат;

X_c, Y_c, Z_c – координаты центра оптической системы в земной системе координат;

$R[\varphi, \omega, \chi]$ – матрица угловых элементов (матрица вращения) в земной системе координат;

s, l – координаты объекта на снимке;

x_p, y_p – координаты главной точки оптической системы;

f – фокусное расстояние оптической системы;

m – масштабный коэффициент.

Функциональная зависимость между координатами объекта на снимке и на местности для обратной фотограмметрической задачи, основанная на известных уравнениях коллинеарности, имеет вид:

$$\begin{aligned} s_j &= -f \frac{r_{11}(X_j - X_i) + r_{21}(Y_j - Y_i) + r_{31}(Z_j - Z_i)}{r_{13}(X_j - X_i) + r_{23}(Y_j - Y_i) + r_{33}(Z_j - Z_i)}; \\ l_j &= -f \frac{r_{12}(X_j - X_i) + r_{22}(Y_j - Y_i) + r_{32}(Z_j - Z_i)}{r_{13}(X_j - X_i) + r_{23}(Y_j - Y_i) + r_{33}(Z_j - Z_i)}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Эти уравнения позволяют определить координаты на изображении s_j, l_j по пространственным прямоугольным координатам (X_j, Y_j, Z_j) точки земной

поверхности при известных значениях координат точки фотографирования (X_i, Y_i, Z_i) , фокусного расстояния камеры f и направляющих косинусов $(r_{11}, \dots, r_{33})_j$ главного проектирующего луча.

Некоторые разработчики КА ДЗЗ обеспечивают реализацию своих строгих моделей съемочных систем в фотограмметрическом программном обеспечении. В этом случае появляется возможность уточнить параметры геодезической привязки сканерных снимков по наземным опорным данным на основе решения обратной фотограмметрической задачи. При этом следует иметь в виду, что уточнение геодезической привязки возможно только в том случае, если исходное изображение не подвергалось геометрической коррекции [56, 57, 80].

Для точной геодезической привязки космических снимков с использованием строгой модели требуется не менее четырех опорных точек расположенных в углах снимков. Это условие далеко не всегда удается выполнить. Кроме того, некоторые производители по принципиальным соображениям не поставляют космические сканерные снимки в сочетании со строгими моделями съемочной системы. В таких случаях для геодезической привязки космических сканерных снимков используются универсальные модели сканерной съемки [78].

1.1.2 Универсальная модель сканерной съемки

При отсутствии строгой модели съемочной системы или какой-либо другой математической модели, позволяющей установить связь между пиксельными координатами снимка и пространственными координатами объектов местности, при обработке сканерных снимков применяют универсальные модели сканерной съемки, математическая основа которых базируется на общих положениях геометрии съемки. Таки модели не зависят от типа съемочной системы и отсутствия бортовой измерительной информации [13, 50, 53, 70]. Универсальные модели применяются, как правило, для небольших по площади фрагментов сканерных изображений. Обязательным условием их применения является наличие наземных опорных данных в количестве достаточном для определения

параметров модели. Универсальные модели строятся на основе известных математических зависимостей, применяемых при фотограмметрической обработке снимков:

- аффинные преобразования;
- проективные преобразования, применяемые при геодезической привязке кадровых снимков;
- параллельно-перспективные преобразования.

Применение универсальных моделей основано на решении обратной задачи, когда по равномерно расположенным по всей площади снимка наземным опорным данным определяются параметры модели, устанавливающей связь между пиксельными координатами изображения и геодезическими координатами соответствующих точек на земной поверхности. Эти модели не используют метаданные снимка. Значения всех входящих в них коэффициентов определяются по опорным точкам – по их пиксельным (x, y) координатам на снимке и координатам (X, Y, Z) на местности.

При определении параметров универсальных моделей, как правило, применяют метод наименьших квадратов. При использовании такого подхода опорные данные должны равномерно покрывать всю территорию съемки, что не всегда возможно в силу разных причин. Поэтому применение универсальных моделей оправдано, например, при создании ортофотопланов среднего масштаба (1:25000, 1:50000) на территории, заблаговременно покрытые крупномасштабными ортоизображениями (1:2000 – 1:10000). В этом случае больше возможностей по выбору расположения опорных точек (четких контуров местности). При этом обязательным условием применения такого подхода является наличие детальной цифровой модели рельефа, обеспечивающей определение высот контурных точек с достаточной точностью.

Универсальные модели видов (1.4) – (1.6) реализованы в цифровой фотограмметрической станции ЦФС «Photomod» [53]. Для определения пиксельных координат сканерного снимка (*line, sample*) в этих моделях используются следующие математические зависимости:

- аффинная модель [81];

$$\begin{aligned} line &= A_1 \cdot X + A_2 \cdot Y + A_3 \cdot Z + A_4; \\ sample &= A_5 \cdot X + A_6 \cdot Y + A_7 \cdot Z + A_8, \end{aligned} \quad (1.4)$$

- проективная модель [28];

$$\begin{aligned} line &= \frac{A_1 \cdot X + A_2 \cdot Y + A_3 \cdot Z + A_4}{C_1 \cdot X + C_2 \cdot Y + C_3 \cdot Z + 1}; \\ sample &= \frac{B_1 \cdot X + B_2 \cdot Y + B_3 \cdot Z + B_4}{C_1 \cdot X + C_2 \cdot Y + C_3 \cdot Z + 1}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

- параллельно-перспективная модель [51];

$$\begin{aligned} line &= L_1 \cdot X + L_2 \cdot Y + L_3 \cdot Z + L_4; \\ sample &= \frac{L_5 \cdot X + L_6 \cdot Y + L_7 \cdot Z + L_8}{L_9 \cdot X + L_{10} \cdot Y + L_{11} \cdot Z + 1}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

В приведенных выражениях A , B , C и L - параметры моделей, а (X, Y, Z) - пространственные прямоугольные координаты точки на местности.

Наиболее часто применяемой из приведенных универсальных моделей является проективная модель (*DLT - Direct Linear Transformation*) [27, 67, 85], в которой проективные зависимости применяются отдельно для каждой из координатных осей снимка [28, 46, 75].

Задачей построения универсальных моделей является определение значений их параметров (A_i , B_i , C_i , L_i) по координатам опорных точек. При этом количество и равномерность расположения опорных точек имеет важное значение. Во всех случаях для получения надежного результата необходимо использовать не менее 10 опорных точек.

1.1.3 Модель в виде рациональных полиномов

Другим универсальным подходом к описанию связи пиксельных координат снимка с соответствующими им геодезическими координатами точек местности является подход, основанный на использовании рациональных полиномов - *RPC (Rational Polynomial Coefficients)*. Этот подход служит альтернативой применению строгих моделей съемочных систем, так практически не уступает им по точности. Он основан на использовании аппроксимирующей конструкции, параметры

которой определяются таким образом, чтобы наиболее точно описать на всей территории съемки значения пиксельных координат снимка, рассчитанные по строгой модели съемочной системы с использованием соотношения вида (1.3) (Рисунок 1.1). С этой целью создается пространственная сетка с заданными геодезическими координатами B, L, H каждому узлу которой ставятся в соответствие значения пиксельных координат снимка [19], рассчитанные по строгой модели съемочной системы, которые затем аппроксимируются комбинацией алгебраических полиномов.

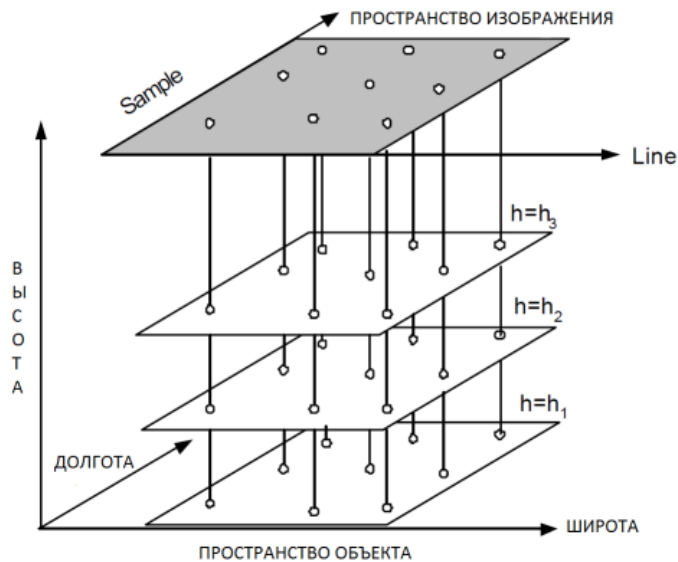


Рисунок 1.1 - Структура пространственной сетки, используемой при построении RPC [63]

В качестве аппроксимирующей конструкции используется комбинация алгебраических полиномов третьей степени [52], которая может быть представлена в следующем виде:

$$s(\text{sample}) = P_s(B, L, H) = \frac{P_s^1(B, L, H)}{P_s^2(B, L, H)} ;$$

$$l(\text{line}) = P_l(B, L, H) = \frac{P_l^1(B, L, H)}{P_l^2(B, L, H)} , \quad (1.7)$$

где s и l – нормированные координаты точки сканерного изображения по столбцу и строке соответственно;

B, L, H – нормированные геодезические координаты и высоты точек местности;

$P_S^1, P_S^2, P_L^1, P_L^2$ – полиномы третьей степени вида:

$$P^{1,2}(B, L, H) = C_1 + C_2 \cdot L + C_3 \cdot B + C_4 \cdot H + C_5 \cdot L \cdot B + C_6 \cdot L \cdot H + C_7 \cdot B \cdot H + C_8 \cdot L \cdot L + C_9 \cdot B \cdot B + C_{10} \cdot H \cdot H + C_{11} \cdot L \cdot B \cdot H + C_{12} \cdot L \cdot L \cdot L + C_{13} \cdot L \cdot B \cdot B + C_{14} \cdot L \cdot H \cdot H + C_{15} \cdot L \cdot L \cdot B + C_{16} \cdot B \cdot B \cdot B + C_{17} \cdot B \cdot H \cdot H + C_{18} \cdot L \cdot L \cdot H + C_{19} \cdot B \cdot B \cdot H + C_{20} \cdot H \cdot H \cdot H. \quad (1.8)$$

Получаемые из исходных значений с помощью линейного преобразования, нормированные величины не превосходят единицы по абсолютной величине, что повышает надежность вычислений. Нормирование выполняется по следующим формулам [51, 63].

$$\begin{aligned} line_N &= \frac{line-offset_l}{scale_l}; \\ sample_N &= \frac{sample-offset_s}{scale_s}; \\ B_N &= \frac{B-offset_B}{scale_\phi}; \\ L_N &= \frac{L-offset_L}{scale_\lambda}; \\ H_N &= \frac{H-offset_H}{scale_h}, \end{aligned} \quad (1.9)$$

где $scale \alpha$ и $offset \alpha$ – коэффициенты нормирования для переменной α (масштабный коэффициент, смещение относительно начала системы координат).

В силу своей унифицированности математические модели геодезической привязки в виде RPC-полиномов получили наиболее широкое распространение и повсеместно используются в программных средствах, предназначенных для фотограмметрической обработки космических сканерных снимков. В связи с этим для проведения исследований по повышению точности геодезической привязки космических сканерных снимков была выбрана именно эта математическая модель.

1.2 Математические модели уточнения геодезической привязки сканерных снимков с RPC

Из приведенных в таблице 1 данных следует, что ошибки геодезической привязки космических снимков в 5–10 раз превышают по величине их пространственное разрешение. В лучшем случае средняя квадратическая ошибка, характеризующая точность геодезической привязки снимков, находится на уровне 2,5–5,0 метров. В связи с этим одна из задач фотограмметрической обработки космических сканерных снимков – это повышение точности их геодезической привязки (ориентирования) с целью создания геопространственной продукции (ортофотопланов, цифровых моделей рельефа и местности) с максимально высокой точностью.

Какая бы математическая модель съемки не использовалась для установления соотношения между пиксельными координатами точки на снимке и ее геодезическими координатами на местности уточнение геодезической привязки снимка возможно только с использованием наземных опорных данных. Учитывая сложность математических зависимостей, используемых в моделях с рациональными полиномами, а также большое количество числовых параметров входящих в эти модели, на практике в качестве уточняющих моделей применяют упрощенные математические зависимости, с помощью которых определяют поправки в координаты, рассчитанные по RPC [58, 61, 63, 82].

В зависимости от геометрических свойств космических сканерных снимков могут использоваться разные методы уточнения их геодезической привязки, основанные на определении дополнительных поправок к базовой модели геодезической привязки в виде RPC. В качестве математической основы для расчета таких поправок используются:

- преобразования типа «сдвиг» - линейное смещение по обоим координатным осям;
- аффинные преобразования;
- полиномиальные преобразования.

Выбор вида математической модели поправок определяется тем, насколько корректно исходная строгая модель съемочной системы и построенная на ее основе модель, в виде RPC полиномов, описывают геометрию сканерного снимка. На практике многократно проверено, что космические снимки КА ДЗЗ WorldView, GeoEye, Pleiades и т. п., и их математические модели в виде RPC обладают такими свойствами, которыми позволяют уточнить их геодезическую привязку только по одной опорной точке путем введения поправок типа «сдвиг» по каждой координатной оси [43].

Для снимков Cartosat, Kompsat, Ресурс–П необходимо применять аффинные поправки, также имеющие линейный характер [51, 52]. В некоторых случаях поправки должны описываться более сложной зависимостью, в качестве которой чаще всего используются полиномы второй степени [60, 61, 63].

1.2.1 Линейное смещение

Поправки в пиксельные координаты снимка, основанные на модели типа «сдвиг» рассчитываются по формулам:

$$\Delta s = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (s'_i - s_i^{RPC}) ; \Delta l = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (l'_i - l_i^{RPC}), \quad (1.10)$$

где s'_i, l'_i - координаты опорной точки, измеренные на снимке, а s_i^{RPC}, l_i^{RPC} - координаты этой же точки, рассчитанные с использованием RPC [73] по точным геодезическим координатам опорной точки, определенным на местности:

$$s_i^{RPC} = P_s(B, L, H); \quad l_i^{RPC} = P_l(B, L, H). \quad (1.11)$$

Поправки типа «сдвиг» могут рассчитываться по любому количеству опорных точек независимо от их расположения.

1.2.2 Аффинные преобразования

Суть аффинных преобразований, применяемых при уточнении геодезической привязки космических сканерных снимков, заключается в корректировке применяемой математической модели основанной на RPC путем добавления к ней поправок, обеспечивающих сдвиг, разворот и приведение к масштабу, задаваемому опорными данными.

Выражение для поправок $\Delta s, \Delta l$ в пиксельные координаты объекта на снимке, вычисляемых с использованием аффинных преобразований имеет вид:

$$\begin{aligned}\Delta s &= a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot l; \\ \Delta l &= b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot l.\end{aligned}\quad (1.12)$$

Поправки типа «сдвиг» являются частным случаем аффинных преобразований. В этом случае их значения определяются как $\Delta s = a_0$; $\Delta l = b_0$.

В общем случае при совместном использовании RPC полиномов $P_s(B, L, H)$, $P_l(B, L, H)$ и аффинных преобразований выражение, связывающее геодезические координаты B, L, H опорной точки и поправки к пиксельным координатам изображения этой же точки на снимке ($\Delta s, \Delta l$) записывается в виде:

$$\begin{aligned}s_{узм} &= s + \Delta s = P_s(B, L, H) + a_0 + a_1 \cdot P_s(B, L, H) + a_2 \cdot P_l(B, L, H); \\ l_{узм} &= l + \Delta l = P_l(B, L, H) + b_0 + b_1 \cdot P_s(B, L, H) + b_2 \cdot P_l(B, L, H).\end{aligned}\quad (1.13)$$

Таким образом, задача уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков с моделью в виде RPC сводится к определению параметров аффинных преобразований (значений коэффициентов a_0, a_1, a_2 и b_0, b_1, b_2), по разностям пиксельных координат опорных точек ($s_{узм} - s$) и ($l_{узм} - l$) измеренных на снимке ($s_{узм}, l_{узм}$) и вычисленных по RPC (s, l).

1.2.3 Полиномиальные преобразования

В случае применения полиномиальных преобразований выражения, связывающих измеренные координаты объекта на снимке и вычисленные координаты этого объекта по значениям его геодезических координат с использованием RPC, будут иметь вид:

$$\begin{aligned}s_{узм} &= s + \Delta s = P_s(B, L, H) + a_0 + a_1 \cdot P_s + a_2 \cdot P_l + a_3 \cdot P_s \cdot P_l + a_4 \cdot P_s \cdot P_s + a_5 \cdot P_l \cdot P_l; \\ l_{узм} &= l + \Delta l = P_l(B, L, H) + b_0 + b_1 \cdot P_s + b_2 \cdot P_l + b_3 \cdot P_s \cdot P_l + b_4 \cdot P_s \cdot P_s + b_5 \cdot P_l \cdot P_l.\end{aligned}\quad (1.14)$$

В этих выражениях используются полиномы второй степени, а определяемыми величинами являются коэффициенты полиномов a_0, a_1, a_2, a_4, a_5 и b_0, b_1, b_2, b_4, b_5 . Полиномиальные поправки в значения пиксельных координат, рассчитанных по RPC, используются в тех случаях, когда недостаточно точности, обеспечиваемой аффинными преобразованиями.

Выбор вида математической модели поправок зависит не только от геометрических свойств снимка и его базовой математической модели, но и от точности, количества и равномерности распределения наземных опорных данных, которые используются для определения поправок. При недостаточности опорных данных приходится применять упрощенную математическую модель поправок. Так при наличии одной опорной точки местности можно выполнить корректирующие координатное преобразование только типа «сдвиг». Для применения аффинных преобразований необходимо располагать не менее чем 4-мя опорными точками местности, равномерно расположенными по полю изображения, а для расчета полиномиальных поправок потребуется не менее 8 - 10 ОТМ при тех же условиях.

Необходимость выполнения условия равномерного распределения опорных данных по территории, покрываемой снимком, на практике, усложняет задачу выбора ОТМ, которыми служат четкие контурные точки местности, хорошо определяемые на снимке, координаты и высоты которых определены с ошибкой не хуже величины пространственного разрешения снимка.

1.3 Использование линейных объектов при уточнении геодезической привязки сканерных снимков

Традиционно при уточнении геодезической привязки космических сканерных снимков в качестве наземных опорных данных используются опорные точки местности, геодезические координаты и высоты которых определяются с высокой точностью геодезическими методами или по крупномасштабным картографическим материалам. В условиях слабоконтурной местности контурные точки местности, которые можно использовать в качестве ОТМ, могут вовсе отсутствовать или их количество и расположение может быть непригодным для решения задачи уточнения геодезической привязки путем определения аффинных или полиномиальных поправок. В связи с этим задача расширения состава и вида опорных данных, используемых для уточнения геодезической привязки космических снимков, представляется актуальной. Одним из решений этой задачи

является использование в качестве опорных данных линейных объектов местности.

Одними из первых практическое решение задач фотограмметрии с использованием линейных объектов предложили зарубежные ученые J.B. Lugnani и S.E. Masry [71, 72, 74]. В работе [71] описан математический аппарат использования линейных объектов местности в качестве планово-высотной основы для геодезической привязки кадровых космических снимков. В основе предложенной математической модели лежат пространственные преобразования подобия, широко применимые в фотограмметрии и геодезии.

$$\bar{X} = \lambda \cdot M \cdot \bar{x} + \bar{X}_0, \quad (1.15)$$

где \bar{X} и \bar{x} являются векторами координат точки p , определенной в пространствах $OXYZ$ (пространственная система координат на местности) и $oxuz$ (пространство модели, снимка); \bar{X}_0 – вектор координат для нулевой точки в пространстве $OXYZ$; M – ортогональная матрица поворотов; λ – масштабный коэффициент.

В результате исследований, проведенных авторами указанных работ, были сделаны выводы о возможности применения линейных объектов в качестве планово-высотной основы и об удовлетворительных точностных характеристиках предлагаемого метода.

Дальнейшие упоминания линейных объектов в качестве опорных данных встречаются в следующих работах зарубежных ученых [64-66, 68, 80, 86, 87].

В отечественных разработках эта идея была реализована применительно к задачам построения фототриангуляции по материалам космической кадровой съемки КА «Комета» [9, 20]. Ее дальнейшее развитие нашло отражение в ряде публикаций, посвященных обоснованию выбора и оценке точности линейных объектов, определяемых по картографическим материалам и используемых в качестве опорных данных при решении фотограмметрических задач [9, 20, 33, 47].

В работах отечественных исследователей [20, 47] отмечается, что линейные объекты при их использовании для решения фотограмметрических задач имеют ряд преимуществ перед точечными объектами:

- являются наиболее долговременными стационарными контурами на местности;
- являются преобладающими контурами на местности, а также в контурной нагрузке цифровых и топографических карт;
- отождествляются в полтора – два раза точнее, чем точечные объекты;
- для отождествления линейных объектов не требуется создания документации типа абрисов.

Несмотря на интерес разработчиков к задаче повышения точности геодезической привязки космических снимков по линейным объектам местности, информация о практических результатах решения этой задачи применительно к космическим сканерным снимкам не встречается. Эта задача может быть решена с применением подхода, основанного на принципах, изложенных в работе [71].

Учитывая, что в проводимом исследовании в качестве основного способа уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков выбран способ, основанный на определении поправок к пиксельным координатам, рассчитываемым по RPC, задача уточнения сводится к отысканию коэффициентов выбранной математической модели поправок, в качестве которой могут выступать преобразование типа «сдвиг» (систематическое смещение) по координатным осям, аффинные или полиномиальные преобразования (1.10 – 1.14). При этом в качестве переменных выступают пиксельные координаты изображения, рассчитанные по геодезическим координатам объектов местности с использованием рациональных полиномов (1.7). В отличие от традиционного подхода, предполагающего использование в качестве наземных опорных данных контурных точек (опорных точек местности), рассмотрим вариант использования точек местности, принадлежащих отрезкам прямых линий. При этом, как рекомендовано в [71], уравнение пространственной прямой представим в параметрической форме:

$$t = \frac{X-X_1}{X_2-X_1} = \frac{Y-Y_1}{Y_2-Y_1} = \frac{Z-Z_1}{Z_2-Z_1}. \quad (1.16)$$

В (1.16) (X_1, Y_1, Z_1) и (X_2, Y_2, Z_2) — это пространственные прямоугольные координаты точек, лежащих на одной прямой. С практической точки зрения это координаты концов отрезка прямой определенные на местности. Способом определения этих координат могут быть как полевые геодезические измерения, так и измерения по картографическим материалам.

В другом виде параметрические уравнения, связывающие координаты произвольной точки прямой (X, Y, Z) с координатами концов ее отрезка (X_1, Y_1, Z_1) и (X_2, Y_2, Z_2) могут быть записаны как:

$$\begin{aligned} X &= X_1 + t \cdot (X_2 - X_1); \\ Y &= Y_1 + t \cdot (Y_2 - Y_1); \\ Z &= Z_1 + t \cdot (Z_2 - Z_1). \end{aligned} \quad (1.17)$$

Для линий малой протяженности с небольшими допущениями пространственные прямоугольные координаты (X, Y, Z) можно заменить на пространственные геодезические координаты (B, L, H) , тогда уравнения (1.17) примут вид:

$$\begin{aligned} B &= B_1 + t \cdot (B_2 - B_1); \\ L &= L_1 + t \cdot (L_2 - L_1); \\ H &= H_1 + t \cdot (H_2 - H_1). \end{aligned} \quad (1.18)$$

Для практического применения целесообразно выполнить нормирование геодезических координат, входящих в выражение (1.18), используя в качестве нормирующих параметров *offset* a геодезические координаты середины отрезка, а в качестве параметров *scale* a для широты и долготы, соответственно нормирующие множители R/ρ и $R/\rho \cos(B)$, где R - средний радиус Земли, ρ - значение радиана.

Подставляя выражение для геодезических координат в параметрической форме (1.18) в выражение для полинома третьей степени (1.8), являющееся базовым для RPC, получим:

$$\begin{aligned}
P_{l,s}^{1,2} = & C_1 + C_2 \cdot [L_1 + t \cdot (L_2 - L_1)] + C_3 \cdot [B_1 + t \cdot (B_2 - B_1)] + C_4 \cdot [H_1 + t \cdot \\
& (H_2 - H_1)] + C_5 \cdot [L_1 + t \cdot (L_2 - L_1)] \cdot [B_1 + t \cdot (B_2 - B_1)] + C_6 \cdot [L_1 + t \cdot \\
& (L_2 - L_1)] \cdot [H_1 + t \cdot (H_2 - H_1)] + C_7 \cdot [B_1 + t \cdot (B_2 - B_1)] \cdot [H_1 + t \cdot (H_2 - H_1)] + \\
& C_8 \cdot [L_1 + t \cdot (L_2 - L_1)]^2 + C_9 \cdot [B_1 + t \cdot (B_2 - B_1)]^2 + C_{10} \cdot [H_1 + t \cdot (H_2 - H_1)]^2 + \\
& C_{11} \cdot [L_1 + t \cdot (L_2 - L_1)] \cdot [B_1 + t \cdot (B_2 - B_1)] \cdot [H_1 + t \cdot (H_2 - H_1)] + C_{12} \cdot \\
& [L_1 + t \cdot (L_2 - L_1)]^3 + C_{13} \cdot [L_1 + t \cdot (L_2 - L_1)] \cdot [B_1 + t \cdot (B_2 - B_1)]^2 + C_{14} \cdot [L_1 + \\
& t \cdot (L_2 - L_1)] \cdot [H_1 + t \cdot (H_2 - H_1)]^2 + C_{15} \cdot [L_1 + t \cdot (L_2 - L_1)]^2 \cdot [B_1 + t \cdot \\
& (B_2 - B_1)] + C_{16} \cdot [B_1 + t \cdot (B_2 - B_1)]^3 + C_{17} \cdot [B_1 + t \cdot (B_2 - B_1)] \cdot [H_1 + t \cdot \\
& (H_2 - H_1)]^2 + C_{18} \cdot [L_1 + t \cdot (L_2 - L_1)]^2 \cdot [H_1 + t \cdot (H_2 - H_1)] + C_{19} \cdot [B_1 + t \cdot \\
& (B_2 - B_1)]^2 \cdot [H_1 + t \cdot (H_2 - H_1)] + C_{20} \cdot [H_1 + t \cdot (H_2 - H_1)]^3. \quad (1.19)
\end{aligned}$$

Обозначив $s_t^{RPC} = P_s^{1,2}(B, L, H, t)$; $l_t^{RPC} = P_l^{1,2}(B, L, H, t)$, выражение для определения поправок на основе аффинных преобразований можно записать в виде:

$$\begin{aligned}
F_s = \Delta s = & a_0 + a_1 \cdot s_t^{RPC} + a_2 \cdot l_t^{RPC}; \\
F_l = \Delta l = & b_0 + b_1 \cdot s_t^{RPC} + b_2 \cdot l_t^{RPC}. \quad (1.20)
\end{aligned}$$

Если Δs и Δl рассматривать как разность пиксельных координат точки отрезка прямой, измеренных на снимке, и пиксельных координат этой же точки, рассчитанных по RPC, то неизвестными в выражении (1.20) останутся параметры аффинных преобразований и параметр t .

Аналогичную систему уравнений можно составить для полиномиальных поправок:

$$\begin{aligned}
F_s = \Delta s = & a_0 + a_1 \cdot l_t^{RPC} + a_2 \cdot s_t^{RPC} + a_3 \cdot l_t^{RPC} \cdot s_t^{RPC} + a_4 \cdot l_t^{RPC} \cdot l_t^{RPC} + a_5 \cdot s_t^{RPC} \cdot s_t^{RPC}; \\
F_l = \Delta l = & b_0 + b_1 \cdot l_t^{RPC} + b_2 \cdot s_t^{RPC} + b_3 \cdot l_t^{RPC} \cdot s_t^{RPC} + b_4 \cdot l_t^{RPC} \cdot l_t^{RPC} + b_5 \cdot s_t^{RPC} \cdot s_t^{RPC}. \quad (1.21)
\end{aligned}$$

При определении параметров преобразований (a_i, b_i) для каждой измеряемой на отрезке произвольной точки составляется два уравнения, следовательно, для случая аффинных преобразований задача решается при наличии не менее семи отрезков прямых, а для случая полиномиальных

преобразований при наличии не менее десяти. При этом для каждого отрезка прямой определяется свое значение параметра t .

Задача одновременного определения параметров преобразований (a_i, b_i) и параметров t является нелинейной и требует применения методов решения систем нелинейных уравнений [14, 17, 19].

Описанный математический аппарат использования отрезков прямых в целях уточнения геодезической привязки космических снимков с RPC на основе определения параметров аффинных и полиномиальных преобразований может быть применен и к пространственным кривым. Для этого уравнения, описывающие пространственные кривые, должны быть представлены в параметрической форме.

Выводы по первому разделу

Установлена актуальность расширения состава опорных наземных данных, используемых при уточнении геодезической привязки космических сканерных снимков. Проанализированы результаты научной работы по использованию линейных объектов в целях повышения точности геодезической привязки космических снимков. Сделаны выводы о возможности использования линейных объектов для повышения точности геодезической привязки космических сканерных снимков высокого разрешения. Описан математический аппарат, предлагаемый для установления связи координат линейных объектов на космическом снимке и на местности. Сформулирована задача уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков по линейным объектам.

РАЗДЕЛ 2. Методика уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков по отрезкам прямых

2.1 Математическая основа методики уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков по отрезкам прямых

В первом разделе изложены теоретические положения метода уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков с использованием опорных данных в виде линейных объектов. В соответствии с этими положениями связь между координатами произвольной точки, принадлежащей отрезку прямой на изображении, и координатами той же точки, принадлежащей линейному объекту местности, устанавливается с использованием RPC и аффинных или полиномиальных преобразований. При этом определение параметров этих преобразований должно выполняться одновременно с определением положения точки на отрезке прямой на местности соответствующей точке, измеренной на снимке. Это означает, что для точки прямой, отображаемой на снимке, необходимо найти соответствующую точку пространственной прямой на местности, представленной в параметрической форме (1.17) и заданной координатами (X, Y, Z) или (B, L, H) концов ее отрезка. Для определения соответствующей точки на пространственной прямой достаточно определить параметр t , задающей ее положение на этой прямой.

Зависимости (1.20) и (1.21), связывающие пиксельные координаты (s, l) точки прямой на снимке с параметрами преобразований (a_i, b_i) и величиной t , а также с пространственными координатами (B, L, H) отрезка прямой на местности, имеют нелинейный вид. Для численного решения систем нелинейных уравнений применяют итерационные методы последовательных приближений и метод Ньютона в различных модификациях [21]. В методе Ньютона, основанном на принципах простой итерации, поиск решения осуществляется путем

последовательных приближений, на каждом шаге которых рассчитываются уточненные значения определяемых параметров. Применение метода Ньютона предполагает линеаризацию исходных уравнений, которая позволяет перейти к решению системы линейных уравнений. Линеаризация выполняется путем определения первых производных от исходной функции по каждой из переменных (определяемых параметров).

В общем случае в практике фотограмметрических работ число наземных опорных данных превышает число искомых параметров геодезической привязки. Поэтому поиск неизвестных осуществляется по методу наименьших квадратов, то есть под условием минимума суммы квадратов поправок в измерения. Применение метода Ньютона для поиска оптимального решения под этим условием, требует получения аналитических выражений и вычисления значений для вторых производных, что весьма трудоемко. Более простое решение этой задачи обеспечивает метод Гаусса-Ньютона [16, 22, 23], который является расширенным методом наименьших квадратов для случая нелинейного вида исходных уравнений связи. Как и метод Ньютона для нелинейных уравнений, этот метод обладает квадратичной сходимостью, что важно при поиске решений итерационным способом. Таким образом, для определения неизвестных параметров геодезической привязки космических сканерных снимков применим метод простых приближений, на каждом шаге которого поправки к приближенным параметрам геодезической привязки определяются методом наименьших квадратов [14].

В матричном виде уравнения поправок записываются [17, 19, 40]:

$$V = A X + L, \quad (2.1)$$

где V – вектор поправок в измерения $v_{s,l}$ (в пиксельные координаты);

X – вектор неизвестных (поправок к предварительным значениям параметров преобразований - a_i, b_i, t_j);

L – вектор свободных членов, определяемых как разность измеренных и вычисленных значений пиксельных координат;

A – матрица первых производных от функций F_s и F_l , связывающих пиксельные координаты на изображении s, l с определяемыми параметрами (a_i, b_i, t_j) .

При переходе к системе нормальных уравнений получим

$$A^T A X + A^T L = 0. \quad (2.2)$$

При составлении системы нормальных уравнений в данном случае не используется матрица весов, поскольку измерения полагаются равноточными. Решением этой системы уравнений является

$$X = -(A^T A)^{-1} A^T L. \quad (2.3)$$

Реализация итерационного способа решения предполагает вычисление на каждом шаге итерационного процесса поправок к значениям неизвестных, полученных на предыдущем шаге.

$$X_k = X_{k-1} + \Delta X_k. \quad (2.4)$$

Поправки в измерения после каждого приближения вычисляются по формуле (2.1).

При практической реализации выбранного метода в качестве начального приближения будем использовать нулевые значения определяемых параметров, а в качестве критерия сходимости итерационного процесса соотношение

$$(\Delta X_{k-1} / \Delta X_k) < 10^{-7}. \quad (2.5)$$

Количество неизвестных в уравнениях (2.1) определяется видом используемого преобразования («сдвиг», аффинные или полиномиальные преобразования) и количеством опорных данных в виде линейных объектов. При преобразовании типа «сдвиг» число m определяемых параметров a_i, b_i составляет $m = 2$ (для каждой координатной составляющей); при аффинных преобразованиях $m = 6$, а при полиномиальных преобразованиях $m = 10$. Общее число неизвестных определяется соотношением $r = m + n$, где n – число линейных объектов, участвующих в решении.

Для случая определения параметров аффинных преобразований ($m = 6$) и использования в качестве опорных данных только линейных объектов матрица A будет иметь вид

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_s}{\partial a_0} & \frac{\partial F_s}{\partial a_1} & \frac{\partial F_s}{\partial a_2} & \frac{\partial F_s}{\partial b_0} & \frac{\partial F_s}{\partial b_1} & \frac{\partial F_s}{\partial b_2} & \frac{\partial F_s}{\partial t_1} & \frac{\partial F_s}{\partial t_2} & \dots & \frac{\partial F_s}{\partial t_n} \\ \frac{\partial F_l}{\partial a_0} & \frac{\partial F_l}{\partial a_1} & \frac{\partial F_l}{\partial a_2} & \frac{\partial F_l}{\partial b_0} & \frac{\partial F_l}{\partial b_1} & \frac{\partial F_l}{\partial b_2} & \frac{\partial F_l}{\partial t_1} & \frac{\partial F_l}{\partial t_2} & \dots & \frac{\partial F_l}{\partial t_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Выбранный математический метод позволит в едином алгоритме определять неизвестные параметры преобразований не только по линейным объектам, но в комбинации с опорными точками местности. Добавление в систему уравнений поправок A уравнений, составленных для ОТМ, позволяет определять коэффициенты (a_i, b_i) по обоим видам опорных данных (отрезки линейных объектов и ОТМ) одновременно. Это обстоятельство позволяет значительно расширить возможности метода, так как на практике такая ситуация наиболее распространена. Для случая совместного определения по линейным объектам и опорным точкам местности параметров (a_i, b_i) аффинных преобразований матрица A будет иметь вид:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_s}{\partial a_0} & \frac{\partial F_s}{\partial a_1} & \frac{\partial F_s}{\partial a_2} & \frac{\partial F_s}{\partial b_0} & \frac{\partial F_s}{\partial b_1} & \frac{\partial F_s}{\partial b_2} & \frac{\partial F_s}{\partial t_1} & \frac{\partial F_s}{\partial t_2} & \dots & \frac{\partial F_s}{\partial t_n} \\ \frac{\partial F_l}{\partial a_0} & \frac{\partial F_l}{\partial a_1} & \frac{\partial F_l}{\partial a_2} & \frac{\partial F_l}{\partial b_0} & \frac{\partial F_l}{\partial b_1} & \frac{\partial F_l}{\partial b_2} & \frac{\partial F_l}{\partial t_1} & \frac{\partial F_l}{\partial t_2} & \dots & \frac{\partial F_l}{\partial t_n} \\ \frac{\partial F_s}{\partial a_0} & \frac{\partial F_s}{\partial a_1} & \frac{\partial F_s}{\partial a_2} & \frac{\partial F_s}{\partial b_0} & \frac{\partial F_s}{\partial b_1} & \frac{\partial F_s}{\partial b_2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\partial F_l}{\partial a_0} & \frac{\partial F_l}{\partial a_1} & \frac{\partial F_l}{\partial a_2} & \frac{\partial F_l}{\partial b_0} & \frac{\partial F_l}{\partial b_1} & \frac{\partial F_l}{\partial b_2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

В верхней части матрицы A расположены коэффициенты уравнений поправок для линейных объектов, а в нижней части для опорных точек местности. Во всех случаях свободные члены уравнений поправок определяются выражением:

$$L = \begin{bmatrix} \Delta s \\ \Delta l \\ \dots \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

где $\Delta s = s_{\text{изм}} - s_{\text{выч}}$; $\Delta l = l_{\text{изм}} - l_{\text{выч}}$ значения разностей пиксельных координат, измеренных на снимке и вычисленных по уточняемой модели геодезической привязки.

Для параметрических преобразований отличие в записи уравнений поправок будет заключаться только в том, что в них увеличится количество неизвестных параметров (a_i, b_i) , а, следовательно, и количество столбцов

матрицы A . Размерность матрицы A в общем случае определяется как $d \times r$, а размерность вектора L - d , где r – число определяемых параметров (неизвестных); d – удвоенное число опорных данных (линейных объектов и опорных точек местности).

Таким образом, решение системы уравнений (2.1) методом последовательных приближений под условием минимума суммы квадратов поправок $v_{s,l}$ на каждом шаге итеративного процесса позволяет определить неизвестные параметры преобразований a_i, b_i , которые являются параметрами математической модели уточняющей геодезическую привязку космического снимка с исходной моделью геодезической привязки в виде RPC.

2.2 Условия применения метода уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков по отрезкам прямых

Традиционная методика геодезической привязки космических сканерных снимков по опорным точкам местности имеет ряд недостатков, основным из которых является недостаточное количество таких точек в слабоконтурной местности. Предлагаемый метод позволяет частично устранить этот недостаток за счет использования линейных объектов, которых на местности, как правило, больше, чем точечных. Практическая реализация этого метода уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков предполагает установление требований к исходным данным и к процессу их обработки, в результате которой определяются параметры преобразований, дополняющих RPC, как математическую модель геодезической привязки снимков. Поэтому при разработке методики, реализующей предлагаемый метод, основными вопросами являлись вопросы определения оптимального состава опорных данных и их расположения по территории, покрываемой снимком, а также вопросы обработки измерений выполненных на снимке и на местности.

2.2.1 Выбор вида преобразований, дополняющих RPC

Одним из главных условий применения предлагаемого метода уточнения геодезической привязки является выбор вида преобразования. От выбранного

вида преобразований зависит как точность, так и требования к количеству исходных данных. Как отмечалось в первом разделе, выбор вида преобразования в свою очередь зависит как от свойств космических снимков, так и от состава имеющихся опорных данных. Исходя из опыта геодезической привязки космических снимков разных КА ДЗЗ, и с учетом их пространственного разрешения, можно рекомендовать вид преобразования для уточнения геодезической привязки космических снимков разных производителей (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Рекомендуемый вид преобразований для уточнения геодезической привязки космических снимков

Название КА ДЗЗ	Пространственное разрешение, м	Точность геопозиционирования, м	Рекомендуемый способ уточнения геодезической привязки снимков
PLEIADES-1A, 1B (Франция)	0,50	4,5	«сдвиг»
WorldView-2 (США)	0,46	5	«сдвиг»
WorldView-3 (США)	0,31	3,5	«сдвиг»
WorldView-4 (США)	0,30	3	«сдвиг»
GeoEye-1 (США)	0,41	2,5	«сдвиг»
Ресурс-П (РФ)	1	3,1-21	аффинные преобразования
BlackSky (США)	1,00	10	аффинные преобразования
Ikonos (США)	0,82	23	аффинные преобразования
Jilin-1 (Китай)	0,72	<200	аффинные преобразования
Mohammed VI A, B (Франция)	0,70	4,5	аффинные преобразования

Продолжение таблицы 2.1

Название КА ДЗЗ	Пространственное разрешение, м	Точность геопозиционирования, м	Рекомендуемый способ уточнения геодезической привязки снимков
QuickBird (США)	0,61	23	аффинные преобразования
SuperView-1 (Китай)	0,50	20	аффинные преобразования
Cartosat-3 (Индия)	0,28	-	аффинные преобразования
SPOT-6,7 (Франция, Индия)	2,00	10	аффинные и полиномиальные преобразования
ТН-1,2 (Китай)	2,00	25	аффинные и полиномиальные преобразования
Канопус (РФ)	2,50	-	аффинные и полиномиальные преобразования
Sentinel -2А, 2В (Франция)	10,0	-	аффинные и полиномиальные преобразования
Kompsat (Южная Корея)	0,5	-	аффинные и полиномиальные преобразования
Landsat-8 (США)	15,0	-	аффинные и полиномиальные преобразования

Рекомендации по применению преобразования типа «сдвиг» относятся к условиям, при которых выбор на местности опорных точек и отрезков прямых ограничен. Даже для тех КА ДЗЗ, снимки которых не содержат искажений относительно модели RPC, при достаточном количестве опорных данных рекомендуется применять аффинные преобразования [34, 35]. Использование полиномиальных преобразований возможно лишь при большем числе опорных данных и далеко не всегда обеспечивает повышение точности по сравнению с аффинными преобразованиями, поэтому в общем случае решение при выборе

вида преобразований при уточнении геодезической привязки космических сканерных снимков следует сделать в пользу аффинных преобразований.

2.2.2 Требования к составу и точности опорных данных

Предлагаемый метод обеспечивает повышение точности геодезической привязки космических сканерных снимков как при использовании одного вида исходных данных (ОТМ или отрезки линейных объектов), так и в их комбинации. В третьем разделе будет показано, что возможности метода не ограничиваются использованием линейных объектов, но могут быть распространены на нелинейные объекты местности. Таким образом, состав исходных данных в первую очередь определяется наличием твердых (четких) контуров местности, точность измерения которых на снимке близка к размеру пикселя на местности (пространственному разрешению изображения).

При установлении требований к точности определения координат опорных данных (ОТМ, отрезки линейных объектов) будем исходить из точности измерения координат на снимке в пикселях при условии ее проецирования на местность с учетом размера пикселя. В качестве величины, характеризующей точность, будем использовать среднюю квадратическую ошибку. В этом случае

$$m_{од} = p \cdot m_{сн} \quad (2.9)$$

где $m_{од}$ – средняя квадратическая ошибка определения плановых координат опорных данных на местности (в метрах);

$m_{сн}$ – средняя квадратическая ошибка измерения координат объектов на снимке (в пикселях);

p – размер пикселя на местности (в метрах).

Точность измерения координат объектов на снимке зависит как от качества изображения (контрастность, четкость, яркость), так и от опыта оператора. Будем полагать величину $m_{сн}$ равной 0,5 пикселя [41].

Математический аппарат метода уточнения геодезической привязки снимков с использованием преобразований предусматривает использование наряду с плановыми координатами опорных данных значений их высот. Значение

средней квадратической ошибки определения высот опорных данных будем полагать величине равной 1,5 от средней квадратической ошибки определения плановых координат $m_n = 1,5 m_{од}$.

Выбранный подход к установлению требований к точности опорных данных применим как к опорным точкам местности, так и к линейным объектам.

Выбор объектов в качестве опорных точек местности традиционен. Такими объектами, как правило, являются четкие контурные точки, образованные пересечением линейных объектов (углы бордюров, углы ограждений, углы зданий и т. п.) и «точечные» объекты (крышки люков ливневой канализации, опоры линий воздушной электросети, основания отдельно стоящих деревьев и т. п.). Обязательным условием выбора опорных точек местности является их уверенное опознавание на снимке. Практический опыт показывает, что с ухудшением пространственного разрешения снимка выбор объектов местности, которые могли бы использоваться в качестве опорных точек, резко ограничивается. В этом случае линейные объекты имеют преимущество перед точечными [2, 20].

В качестве линейных объектов местности могут использоваться прямолинейные участки дорог, мосты, дамбы, набережные, основания (фундаменты), края крыш строений, ограждения, трубопроводы и другие объекты. При этом на местности такие объекты должны образовывать прямые пространственные линии на всем мерном интервале (отрезке). Их искривление в плане и по высоте не допустимо, как например, у прямой в плане дороги, но не прямой по высоте.

На рисунках 2.1-2.5 приведены примеры точечных и линейных объектов местности, которые могут использоваться в качестве опорных данных при уточнении геодезической привязки космических снимков с разным пространственным разрешением. Красными кругами выделены точечные объекты. Зеленые линии – линейные объекты.



Рисунок 2.1 - Мелкомасштабный фрагмент снимка КА ДЗЗ Ресурс-П



Рисунок 2.2 - Крупномасштабный фрагмент снимка КА ДЗЗ Ресурс-П



Рисунок 2.3 - Крупномасштабный фрагмент снимка КА ДЗЗ WorldView

На снимках (Рисунки 2.2-2.3) сверхвысокого разрешения (1 м и лучше – снимки КА ДЗЗ WorldView, Ресурс-П и т. п.) целесообразно использовать оба типа опорных данных, точечные и линейные объекты.

Для снимков (Рисунок 2.4) высокого разрешения (10 м и лучше - снимки КА ДЗЗ Канопус-В и т. п.) идентификация точечных объектов затруднительна, но возможна.



Рисунок 2.4 - Линейные объекты (линии голубого цвета) на микрокадре КА ДЗЗ Канопус – В

На снимках (Рисунок 2.5) среднего и низкого разрешения - снимки КА ДЗЗ Sentinel и т. п.) точечные объекты в качестве опорной информации использовать затруднительно.



Рисунок 2.5 - Линейные объекты (линии голубого цвета) на снимке
КА ДЗЗ Sentinel

Сравнение показывает, что на снимках с меньшим разрешением в качестве опорных данных выбираются преимущественно линейные объекты.

При выборе линейных объектов местности (отрезков прямых) следует руководствоваться следующими положениями. Обязательным условием выбора объекта является уверенное распознавание его на снимке и возможность измерения координат объекта с субпиксельной точностью на всей протяженности отрезка.

Наиболее подходящими объектами для уточнения геодезической привязки снимков являются линейные объекты, расположенные на земной поверхности, хотя предлагаемый метод позволяет использовать отрезки любых прямых, в том числе и наклонных, без ограничений по углу наклона.

Методических ограничений на длину отрезков прямых тоже нет. Однако на практике следует учитывать два обстоятельства:

- чем меньше длина отрезка, тем меньше точность задания пространственной прямой;

- при малой длине отрезка определяемая точка (точка, измеряемая на снимке) может выйти за его границы, что приводит к увеличению количества итераций при решении системы уравнений (2.1).

Первое обстоятельство важно учитывать в тех случаях, когда координаты крайних точек отреза определяются с невысокой точностью.

Расширение состава опорных данных, используемых для уточнения геодезической привязки космических снимков, и, как следствие, их количества повышает точность и надежность решения этой задачи.

2.2.3 Требования к распределению опорных данных по площади снимка

Важное значение для решения задачи уточнения геодезической привязки космических снимков с использованием аффинных или полиномиальных преобразований имеет расположение опорных данных на снимке. При определении местоположения опорных данных следует иметь в виду, что преобразования, уточняющие геодезическую привязку космических снимков с RPC, действуют корректно только в той области, где располагаются опорные данные, использовавшиеся для определения их параметров. С удалением от этой области точность может понижаться. Так при определении параметров преобразования типа «сдвиг» по одной опорной точке или по двум линейным объектам, желательно, чтобы опорные данные располагались в центральной области снимка.

Учитывая, что аффинные преобразования носят линейный характер, оптимальным будет расположением опорных данных в углах и в центре снимка, а также их равномерное распределение по всей площади снимка в случае избыточности опорных данных.

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. Это обусловлено нелинейным характером учитываемых остаточных искажений, которые должны быть аппроксимированы алгебраическими полиномами второй степени. Несоблюдение этого требования может привести к появлению в области необеспеченной опорными данными дополнительных искажений. RPC-модели с такими поправками, например, можно использовать для обновления ортофотопланов.

Кроме этих условий, при использовании в качестве опорных данных только линейных объектов, появляется дополнительное ограничение, связанное с параллельностью (однонаправленностью) линейных объектов. Количественные критерии для определения однонаправленности линейных объектов были определены экспериментально (см. Раздел 2.4).

Во всех случаях при решении задачи уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков по наземным опорным данным желательно иметь их избыточное количество с тем, чтобы обеспечить надежность решения. В связи с этим, целесообразна комбинация отрезков прямых и опорных точек местности.

Методика предполагает избыточность исходных данных для определения параметров аффинных или полиномиальных преобразований, но при этом она остается работоспособной при минимуме исходных данных, так как такой случай не редко встречается на практике.

При определении достаточного количества опорных данных (ОТМ и линейных объектов) должны применяться следующие соотношения:

а) для вычисления аффинных преобразований число опорных данных должно соответствовать условию:

$$2 \cdot (K_{отр} + K_{отм}) > \text{число неизвестных} (6 + K_{отр}), \quad (2.10)$$

где, 6 – число определяемых параметров аффинных преобразований $(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2)$,

$K_{отр}$ – число отрезков прямых (линейных объектов местности) и соответствующих им параметров t_j , определяющих положение точки на отрезке.

$K_{отм}$ – число ОТМ,

тогда
$$K_{\text{отр}} + 2 \cdot K_{\text{отм}} > 6, \quad (2.11)$$

б) для полиномиальных преобразований число опорных данных должно превышать число определяемых параметров:

$$2 \cdot (K_{\text{отр}} + K_{\text{отм}}) > 12 + K_{\text{отр}}, \quad (2.12)$$

тогда
$$K_{\text{отр}} + 2 \cdot K_{\text{отм}} > 12. \quad (2.13)$$

2.2.4 Ориентирование космических сканерных снимков по трекам

Разработанная технология уточнения геодезической привязки космических снимков предполагает использование не только новых методов геодезической привязки снимков, но и новых способов получения информации об опорных данных. Использование отрезков прямых в качестве опорных данных создает возможность выполнения плано-высотной подготовки района работ с использованием новых полевых методов. Наиболее простым методом определения положения отрезка прямой на местности является определение координат двух точек, принадлежащих линейному объекту местности, любым из доступных геодезических способов. Однако этот метод требует не меньших трудозатрат на выполнение полевых работ, чем метод, предполагающий определение и использование ОТМ. В тоже время точность определения опорных данных на уровне единиц сантиметров не всегда оправдана. Так для ориентирования космических снимков с разрешением 0,8 м и хуже опорные данные достаточно определять с соизмеримой точностью (0,2 - 0,4 м).

В связи с этим при разработке технологии уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков в качестве одного из основных методов определения координат опорных данных в виде линейных объектов рассматривался метод получения и использования геодезических и навигационных треков, получаемых по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС, GPS и других НКА ГНСС, для определения координат крайних точек отрезков прямых с точностью, достаточной для решения задач по уточнению геодезической привязки космических снимков.

Под геодезическими треками будем понимать совокупность точек траектории движения транспортного средства, координаты которых определены по фазовым измерениям ГНСС-приемников с привязкой по времени, а навигационные треки – это такая совокупность точек, координаты которых определены по кодовым измерениям спутниковых навигационных приемников, например, автомобильных навигаторов. Поскольку геодезические треки определяются с более высокой точностью, чем навигационные, то при отработке технологии они использовались в качестве эталонных по отношению к навигационным трекам в случаях синхронного проведения геодезических и навигационных определений.

2.2.5 Определение условий применения треков в качестве опорных данных при уточнении геодезической привязки космических снимков

ГНСС треки должны определяться на прямолинейных отрезках дорог, хорошо распознаваемых на космическом снимке. Для их дальнейшего использования в процессе уточнения геодезической привязки снимков необходимо оценить точность определения координат точек трека и условия, при которых треки могут идентифицироваться с дорожными объектами, распознаваемыми на снимке.

Для определения геодезических треков используется многоканальная многосистемная спутниковая геодезическая аппаратура известных фирм-производителей *Trimble*, *Leica* и др., обеспечивающая определение координат точек трека в режиме «кинематика» с точностью на уровне первых единиц сантиметров. Такая точность достигается при применении относительного метода спутниковых координатных определений, основанного на определении координат стационарного или движущегося объекта относительно базовой станции, координаты которой известны. Существует несколько вариантов реализации этого метода, обеспечивающих примерно одинаковую точность, которая заведомо выше точности геодезической привязки космических снимком после ее уточнения. Если базовая станция недоступна, то получить дециметровую

точность измерений по измерения спутниковой геодезической аппаратуры можно при использовании специального программного обеспечения с функцией обработки в режиме PPP (Precise Point Positioning), использующей уточненные эфемериды и поправки к бортовым часам навигационных космических аппаратов ГНСС, модели тропосферы, ионосферы и другую информацию [8, 10, 18].

В качестве спутниковой аппаратуры для определения навигационных треков могут использоваться автомобильные навигаторы. Главное назначение автомобильных навигаторов – построение маршрутов и ведение пользователя по ним. Навигаторы могут быть объединены с видеорегистраторами. Они имеют функцию записи координат точек навигационного трека. Некоторые модели автомобильных навигаторов, кроме навигационных треков, позволяют сохранять в памяти приемника измерения в протоколе NMEA 0183 (National Marine Electronics Association). Этот протокол содержит навигационное решение, данные о числе спутников, координаты, скорость, высоту, курс и т. д. Внутри навигаторов данные NMEA-строк конвертируются в файл формата GPX (GPS Exchange) – текстовый файл хранения и обмена данными GPS. Формат GPX позволяет хранить информацию об ориентирах (waypoints), маршрутах (routes) и треках (tracklogs) в системе координат WGS-84. Точность определения координат автомобильными навигаторами составляет 1–5 метров в зависимости от условий наблюдений и конструктивно-технических характеристик навигационных плат навигаторов, а также от возможности приема корректирующей информации, позволяющей уточнить координатное решение (дифференциальный режим) [8, 36].

В соответствии с разработанной методикой геодезической привязки космических снимков высокого разрешения с использованием линейных объектов необходимо на изображении всех выбранных отрезков на снимке измерить произвольную точку, расположенную между двумя точками, определяющими концы отрезка. В отличие от ориентирования космических снимков по линейным объектам, хорошо различимых на снимках, сложность использования отрезков треков заключается в невозможности точного измерения точки на изображении

отрезка трека на снимке. Ошибка измерения будет заключаться в отклонении точки, измеренной на снимке, от точки, которая реально расположена на отрезке трека (Рисунок 2.6).

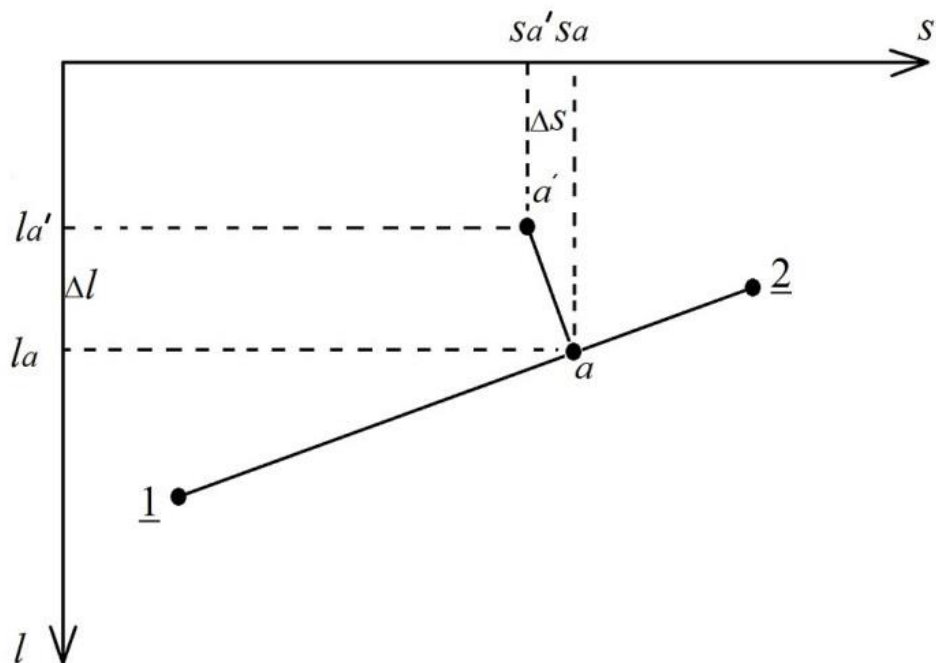


Рисунок 2.6 - Погрешность измерения точки трека на снимке

На рисунке 2.6 обозначены:

1 и 2 – концы отрезка трека на снимке;

a – место на снимке, где необходимо измерить точку;

a' – место на снимке, где было выполнено измерение; $\Delta l = l_a - l_{a'}$;

$\Delta s = s_a - s_{a'}$ – ошибки измерений в пикселях по осям l и S соответственно.

Возможны два варианта учета смещения точки a относительно точки a' :

- приведение координат точек трека измеренного на полосе дорожного движения к обочине (краю дорожного покрытия), хорошо распознаваемой на снимке;
- обратная задача измерение точек отрезков прямых на снимке с учетом того, что автомобиль двигался не по обочине, а, например, по центру полосы. С практической точки зрения оба варианта равнозначны и дают одинаковый результат.

Измерение треков возможно на дорогах с одно-, двух- и многополосным движением. Полоса, по которой движется автомобиль, определяется по данным видеорегистратора. В случае перемещения по многополосным дорогам рекомендуется выполнять запись треков, двигаясь вдоль обочины дороги.

Чтобы минимизировать погрешность измерения точки трека на снимке, на дорогах с однополосным движением автомобилю следует двигаться посередине полосы, а антенну GPS-приемника необходимо разместить по центру корпуса автомобиля.



Рисунок 2.7 - Размещение спутниковой антенны на крыше автомобиля

При движении автомобиля вдоль обочины дороги антенна крепится с правой стороны крыши автомобиля. В первом случае измерения на снимке выполняются посередине дороги, во втором – на обочине

Для достижения точности геодезической привязки космических сканерных снимков 3–5 м при использовании навигационных треков, записанных автомобильным навигатором, следует выбирать треки, проходящие по одно или двухполосным дорогам. В этом случае измерения на снимках следует проводить

по центру полосы, на которой был записан трек. Определить полосу и направление движения можно по временным меткам координат точек трека, хранящихся в исходном файле.

Для экспериментальной проверки предлагаемых методических рекомендаций на отрезках трассы (Рисунок 2.8.а) длиной от 1 до 20 км было записано восемь треков. На крыше автомобиля (Рисунок 2.7) была установлена GPS-антенна геодезического приемника Trimble R7, а внутри салона на передней панели был установлен автомобильный навигатор Garmin. Для приведения измеренных координат треков к уровню земной поверхности измерена высота антенны GPS-приемника на крыше автомобиля и навигатора. В автомобиле также был установлен видеорегистратор для точного определения полосы дороги на маршруте, на котором записывались треки. На обоих приемниках был установлен односекундный интервал записи. Маршрут прокладывался по двухполосной дороге, проходящей по местности разных типов: поле, лесополоса, городская застройка.

Первой задачей эксперимента являлась оценка планового положения треков, записанных автомобильным навигатором, по сравнению с треком, записанным геодезическим приемником. Визуальное сравнение треков выполнялось с использованием программы «Global Mapper». В качестве картографической основы использовался ортофотоплан, созданный по космическим сканерным снимкам КА ДЗЗ WorldView с точностью 1 м.

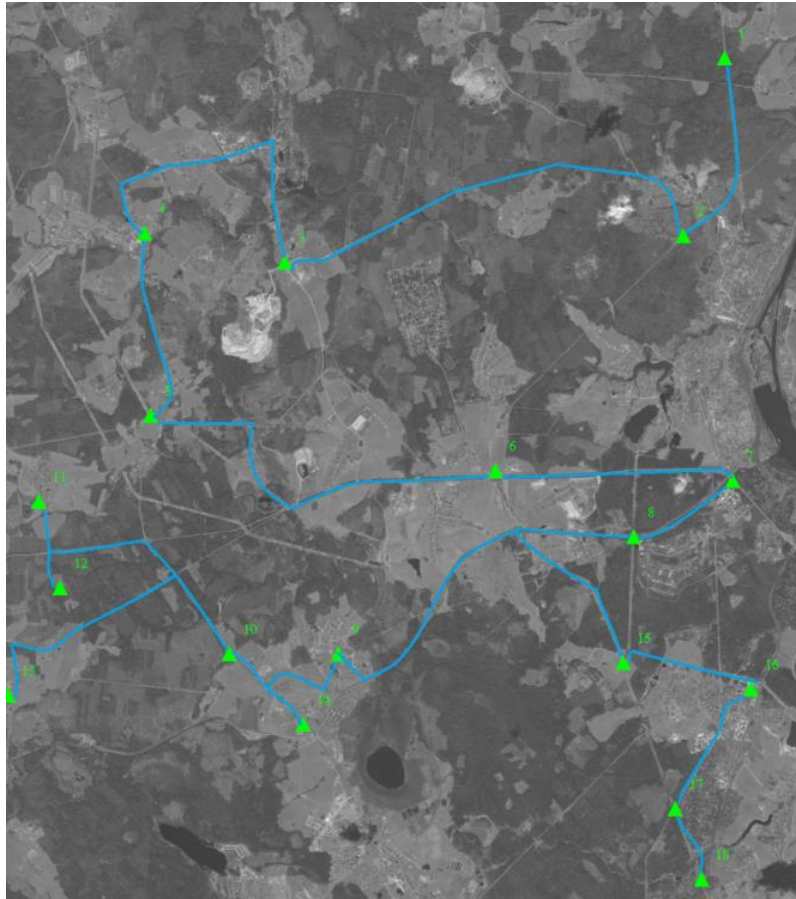


Рисунок 2.8.а - Расположение треков в районе работ



Рисунок 2.8.б - Расхождение треков при движении по прямому участку дороги

На рисунке 2.8.б - геодезический трек (красная линия), навигационный трек (голубая линия). Расхождение между треками 1,3 - 1,6 метров.



Рисунок 2.8.в - Расхождение треков при движении по кривой. Расхождение между треками на повороте дороги до 9 метров

Отклонения плановых координат, записанных автомобильным навигатором, от эталонных координат геодезического трека составили 1–12 м, что обусловлено разными условиями измерений и техническими характеристиками геодезического приемника и автомобильного навигатора. Для детального анализа были выбраны точки треков навигатора и геодезического приемника на прямолинейных участках дорог [3, 29]. Абсолютные значения разностей координат треков варьируются от 0,05 до 4,2 м в плане, а по высоте от 0,01 до 7,4 м (Таблица 2.2).

Таблица 2.2 - Расхождения координат точек треков, полученных геодезическим и навигационным приемником

Номер точки трека	ΔX , м	ΔY , м	ΔH , м
1	-0,045	0,141	-0,487
2	-1,36	0,346	0,057
3	-1,837	-0,771	-2,046
4	0,829	0,407	6,617
5	-0,792	1,117	6,254
6	-0,917	-1,422	-7,094
7	-0,705	-2,615	0,157
8	-0,561	-2,328	0,171
9	0,619	-1,977	7,434
10	1,251	-1,422	4,934
11	4,258	2,818	-0,187
12	1,061	-2,953	-0,298
13	-0,333	-1,265	1,127
14	0,09	-0,79	-0,01
15	-0,674	1,034	4,768
16	-0,442	1,49	3,656
17	1,541	1,352	5,268
18	0,696	0,685	-6,721
Среднее квадратическое отклонение	1,193	0,766	2,680
Среднее арифметическое	1,293	1,043	3,676
Максимальное	4,258	2,818	7,434
Минимальное	-1,837	-2,953	-7,094

Визуальный анализ расхождений (Таблица 2.2) показал, что наибольшее совпадение навигационного и точного треков соответствует открытым участкам дорог, на обочинах которых не было высокой растительности или строений, препятствующих прохождению сигналов от навигационных спутников

(Рисунок 2.8.б). В условиях лесополосы и городской застройки расхождения увеличивались из-за переотражения или потери навигационного сигнала.

Отдельно были проанализированы расхождения координат точек треков на криволинейных участках дорог. Выявлены значительные расхождения плановых координат, которые составили до 12 м (Рисунок 2.8.в). Результаты анализа позволили сделать вывод, что наилучшие условия для получения хороших результатов автомобильным навигатором – открытые, прямолинейные участки дорог, без резких поворотов и придорожной застройки. Ошибки плановых координат точек навигационных треков тогда составляют 1–2 м. Ошибки высот, определенных автомобильными навигаторами, могут достигать 10 м, поэтому при использовании треков, полученных такими навигаторами, для ориентирования космических снимков высоты точек трека целесообразно заменить значениями высотам, полученными по более точным цифровым моделям рельефа.

Дополнительно следует отметить, что расхождения между точным и навигационным треками зависят и от скорости движения автомобиля - чем выше скорость, тем лучше согласуются результаты координатных определений.

2.3 Определение координат линейных объектов

2.3.1 Определение координат линейных объектов на снимке

Измеряемая на снимке точка не обязательно должна попадать в интервал, ограниченный концами отрезка, координаты которых измерены на местности. Однако ее «непопадание» в этот интервал скажется на сходимости итеративного процесса, которая напрямую зависит от близости начальных значений определяемых параметров к искомому результату. Для получения устойчивых решений разработан методический прием, суть которого заключается в предварительном определении координат точки, принадлежащей отрезку, которую надо измерить на снимке. Такой точкой служит «средняя точка» отрезка, координаты которой рассчитываются по координатам крайних точек отрезка и пересчитываются в пиксельные координаты снимка с использованием RPC

полиномов. «Средние точки» отрезков рассчитываются для каждого из отрезков, участвующих в решении.

2.3.2 Определение координат линейных объектов на местности

При разработке методики уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков рассматривалось применение трех способов определения координат крайних точек отрезков линейных объектов местности: геодезического, навигационного и картографического. Геодезический способ предполагает использование спутниковой геодезической аппаратуры или других геодезических инструментов и методов, обеспечивающих точность определения пространственных координат объекта местности на уровне 0,1 – 0,2 м. Навигационный способ, основанный на использовании спутниковой аппаратуры навигационного класса, принимающей и обрабатывающей кодовые навигационные сигналы GPS/ГЛОНАСС, а также на использовании других навигационных средств (например, инерциальных навигационных систем), и обеспечивающий точность координатных определений на уровне 1 – 3 м.

Картографический способ предполагает определение плановых координат и высот объектов местности по крупномасштабным картографическим материалам. В качестве таких материалов могут использоваться топографические планы масштабов 1:2000 - 1:10000 или исходные материалы, применявшиеся при их составлении (ортофотопланы, цифровые модели рельефа) обеспечивающие точность определения координат и высот линейных объектов местности на уровне 1–5 м [44, 45]. Такие картографические материалы наиболее доступны, так как они составляются на достаточно большие по площади территории обжитых и экономических развитых районов.

Особенностью применения картографического способа является раздельное определение плановых координат и высот крайних точек отрезков. При этом сначала определяются плановые координаты, а затем по ним рассчитываются высоты. В тоже время использование картографических материалов имеет большое преимущество перед геодезическим и навигационным способами,

поскольку позволяет определить координаты большого числа равномерно расположенных на территории линейных объектов без выполнения полевых работ.

Выбор способа определения координат линейных объектов местности определяется требованиями к точности координатных определений, которая в свою очередь связана с пространственным разрешением космического снимка соотношением (2.9).

Геодезический способ следует применять при определении координат объектов местности, которые используются в качестве опорных данных при уточнении геодезической привязки космических снимков с пространственным разрешением лучше 2,5 м. Навигационный и картографический способы целесообразно применять при определении координат и высот линейных объектов, используемых для уточнения геодезической привязки космических снимков с пространственным разрешением 2,5 м и хуже. При этом картографический способ будет наиболее эффективен там, где уточнение геодезической привязки будет выполняться с использованием полиномиальных преобразований.

2.3.3 Оценка точности полученного решения на контрольных точках

Как и в фотограмметрических программных средствах, обеспечивающих уравнивание фотограмметрических сетей с использованием наземных опорных данных, при решении задачи уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков с использованием аффинных и полиномиальных преобразований необходимо выполнять контроль точности полученного решения. Контроль осуществляется на опорных данных, не участвовавших при определении параметров преобразований (a_i, b_i) . Суть процедуры контроля заключается в расчете разностей пиксельных координат объекта, измеренных на снимке, с такими же координатами, вычисленными по уточняющей модели. В целях контроля могут использоваться как ОТМ, так и линейные объекты местности. В случае использования линейных объектов осуществляется контроль

попадания точки с координатами, рассчитанными по RPC и (a_i, b_i) на отрезок прямой на местности. При использовании в качестве контрольных данных ОТМ выполняется непосредственное сравнение измеренных и пиксельных координат.

$$\Delta x = x_{\text{изм}} - x_{\text{выч}} ; \Delta y = y_{\text{изм}} - y_{\text{выч}} . \quad (2.14)$$

Использование ОТМ в качестве контрольных данных предпочтительнее, так как по разностям координат проще выполнить оценку точности полученного решения.

В качестве величин, характеризующих точность полученного решения удобно использовать статистические характеристики: среднее арифметическое значение, среднее квадратическое отклонение и максимальное (минимальное) значение.

2.4 Экспериментальная проверка основных положений методики геодезической привязки снимков по отрезкам линейных объектов

Целью экспериментальной проверки основных положений разработанной методики являлась оценка работоспособности предложенного алгоритма и его эффективности при решении задачи повышения точности геодезической привязки космических сканерных снимков при использовании в качестве опорных данных линейных объектов местности (отрезков прямых). Эксперименты проводились с использованием отечественных и зарубежных космических снимков. В качестве контрольных данных использовались опорные точки местности, надежно опознаваемые на этих снимках.

Экспериментальная апробация методики выполнялась с использованием экспериментального программного обеспечения определения параметров, уточняющих геодезическую привязку космических снимков по отрезкам прямых и ОТМ (ПК ГКСС «АФЕКАФЕК.13256-01), разработанного в АО «НИИ ТП» и реализующего алгоритм, описанный в разделе 2.1. [1-3, 5] Для выполнения измерений на космических снимках, построения ортотрансформированных изображений и оценки, и их точности использовался программный комплекс «Photomod» (разработка фирмы «Ракурс»).

Экспериментальный программный комплекс обеспечивает:

- загрузку, формирование и редактирование опорных данных;
- определение параметров преобразований типа «сдвиг», аффинные преобразования, полиномиальные преобразования;
- оценку точности полученных решений;
- экспорт данных для их загрузки в проект ЦФС «Photomod»;
- расчет углов между направлениями, образованными линейными объектами;
- графическое отображение опорных данных.

Вид интерфейса экспериментального программного комплекса представлен на рисунке 2.9.

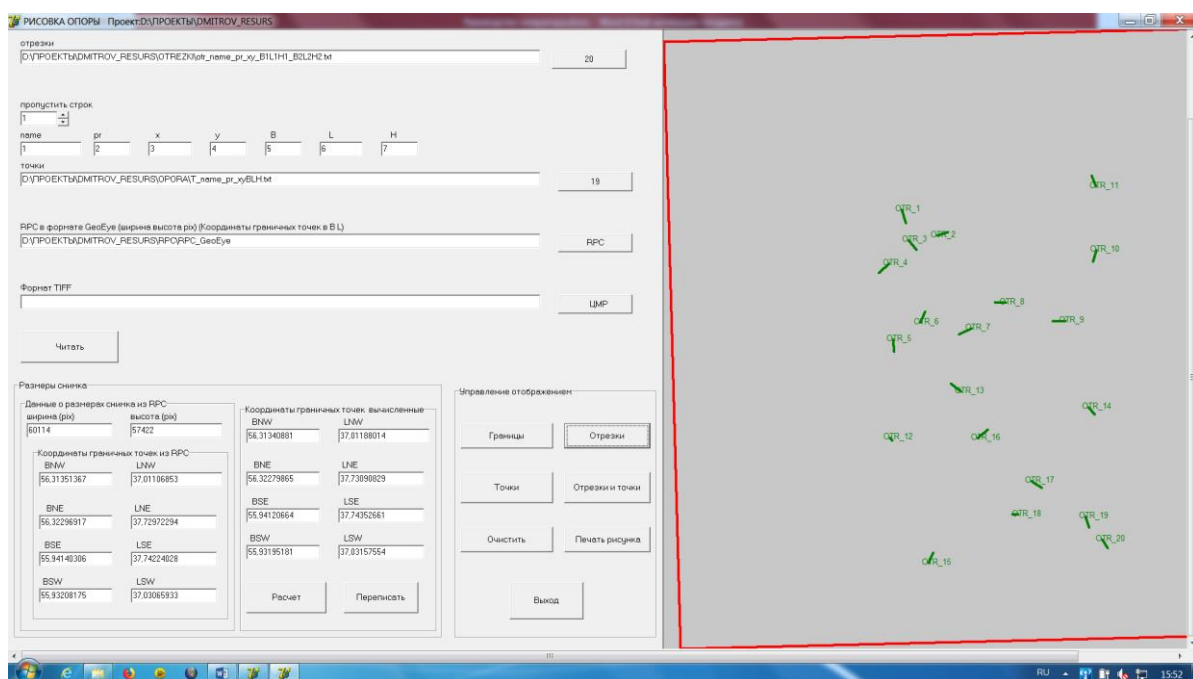


Рисунок 2.9 - Интерфейс экспериментального программного комплекса определения параметров преобразований

На первом этапе экспериментальной проверки методики была выполнена геодезическая привязка космического сканерного снимка КА ДЗЗ Ресурс-П (разрешение 0,8 метра) на территорию Дмитровского района Московской области. Точность геодезической привязки космического снимка до ее уточнения характеризуется величиной средней квадратической ошибки, равной 10,3 метра. В

качестве опорных данных использовались ОТМ и отрезки прямых, плановые координаты которых измерялись на ортофотоплане с разрешением 0,5 м, созданном заблаговременно на эту же территорию по космическим снимкам КА ДЗЗ WorldView. Высоты ОТМ и крайних точек отрезков были получены с использованием глобальной цифровой модели рельефа SRTM. Точность «эталонного» ортофотоплана, созданного по снимкам КА ДЗЗ WorldView, оценивалась по контрольным точкам, координаты и высоты которых были получены геодезическими методами. Она характеризуется средней квадратической ошибкой равной 0,9 пиксель (0,45 м).

Для проведения эксперимента по ориентированию космического снимка КА ДЗЗ Ресурс-П на ортофотоплане были измерены координаты 18 ОТМ, равномерно расположенных по площади снимка, и крайних точек 16 отрезков линейных объектов местности, расположение которых показано на рисунке 2.10

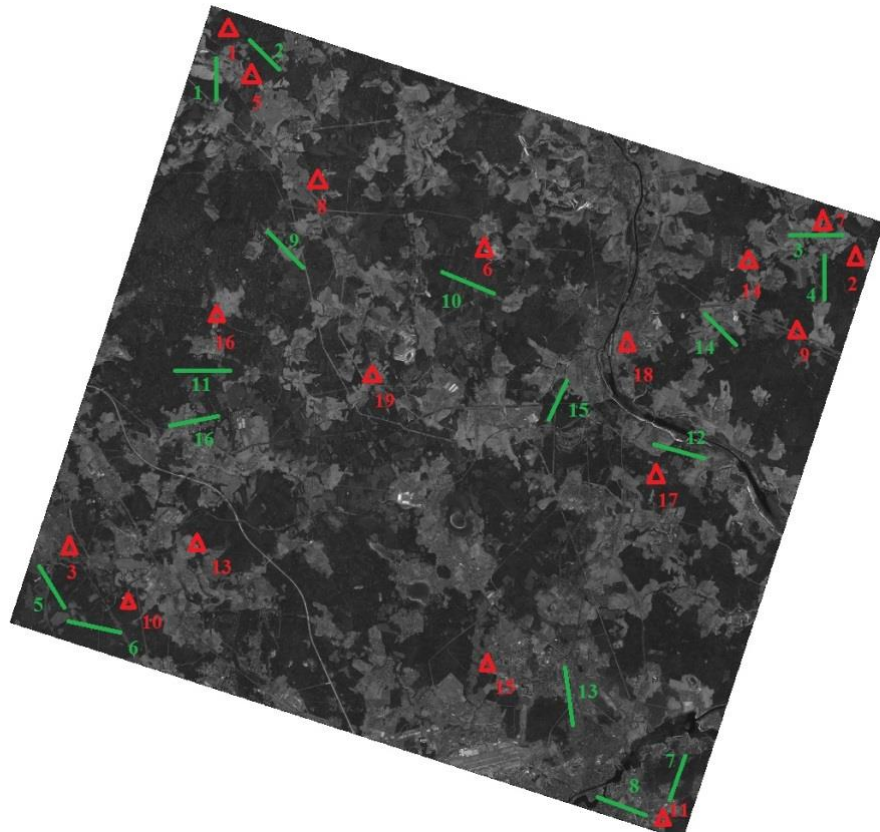


Рисунок 2.10 - Схема расположения отрезков линейных объектов (зеленые линии) и ОТМ (красные треугольники) на снимке

Сначала было выполнено ориентирование снимка только по ОТМ. Значения невязок координат ОТМ, полученных после определения параметров аффинных преобразований приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Значения невязок координат на опорных точках местности после определения параметров преобразования

Номер ОТМ	ΔX (pix)	ΔY (pix)	ΔXY (pix)
1	0,06	-1,6	1,6
2	1,5	-0,8	1,8
3	0,7	0,6	0,9
4	0,6	-1,8	1,9
5	1,0	0,5	1,1
6	-0,8	1,0	1,3
7	0,7	-0,4	0,9
8	0,1	1,3	1,3
9	-0,1	1,3	1,3
10	0,1	1,0	1,0
11	-0,3	1,4	1,4
12	0,8	-1,6	1,8
13	-1,1	-1,1	1,6
14	1,3	-1,5	2,0
15	-1,4	-0,2	1,4
16	-1,8	0,2	1,8
17	-0,4	1,7	1,8
18	-1,0	0,0	1,0
Среднее квадратическое отклонение (СКО)	0,9	1,1	1,4
Среднее арифметическое	0,0	0,0	1,4
Максимальное	1,5	1,7	2,0
Минимальное	-1,8	-1,8	0,9

В таблице 2.3 приведены значения невязок координат опорных точек и их статистические характеристики. Результирующее значение отклонения планового положения точек, полученного после определения параметров преобразования от их исходного планового положения, составило 1,4 пиксель.

На следующем шаге было выполнено ориентирование снимка с использованием только линейных объектов.

Таблица 2.4 - Значения невязок координат точек, принадлежащих отрезкам линейных объектов, после определения параметров преобразования

Номер отрезка прямой	ΔX (pix)	ΔY (pix)	ΔXY (pix)	Значение параметра t
OTR_1	-0,5	-0,1	0,5	0,637
OTR_2	0,0	-0,2	0,2	0,628
OTR_3	0,3	-0,7	0,8	0,584
OTR_4	0,7	0,4	0,8	0,712
OTR_5	-0,1	-0,1	0,2	0,570
OTR_6	0,0	0,0	0,0	0,930
OTR_7	0,8	0,0	0,8	0,463
OTR_8	0,0	0,3	0,3	0,593
OTR_9	0,7	0,4	0,8	0,481
OTR_10	0,2	0,7	0,7	0,148
OTR_11	-0,7	0,7	1,0	0,387
OTR_12	-0,2	-1,0	1,0	0,439
OTR_13	-1,8	0,0	1,8	0,566
OTR_14	0,1	0,1	0,1	0,491
OTR_15	-0,5	0,0	0,5	0,420
OTR_16	1,1	-0,4	1,2	0,330
Среднее квадратическое отклонение (СКО)	0,7	0,4	0,8	
Среднее арифметическое	0,0	0,0	0,7	
Максимальное	1,1	0,7	1,8	
Минимальное	-1,8	-1	0	

Полученное значение СКО, равное 0,8 пикселя (Таблица 2.4), при среднем арифметическом значении невязок близком к нулю, характеризует точность геодезической привязки космического снимка после определения параметров преобразований. Независимая оценка точности ориентирования снимка по отрезкам прямых выполнялась по невязкам на контрольных точках, в качестве которых использовались ОТМ. Такую оценку можно считать независимой, поскольку ОТМ не использовались при уточнении геодезической привязки космического снимка. Результаты оценки приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Значения невязок на контрольных точках после уточнения геодезической привязки космического снимка только по отрезкам линейных объектов

Номер контрольной точки	ΔX (pix)	ΔY (pix)	ΔXY (pix)
1	-0,7	-1,6	1,7
2	1,3	0,1	1,3
3	0,5	0,3	0,6
4	0,8	-1,3	1,5
5	0,4	0,6	0,7
6	-1,1	1,4	1,8
7	0,4	0,4	0,6
8	-0,4	1,5	1,5
9	-0,2	2,1	2,1
10	0,0	0,9	0,9
11	0,0	1,8	1,8
13	0,8	-1,6	1,8
14	-1,4	-0,4	1,5
15	1,3	-1,3	1,9
16	-1,7	-0,3	1,7
17	-1,8	0,7	2,0
18	-0,5	2,2	2,3
19	-1,2	0,2	1,2
Среднее квадратическое отклонение (СКО)	1,0	1,2	1,6
Среднее арифметическое	-0,2	0,3	1,5
Максимальное	1,3	2,2	2,3
Минимальное	-1,8	-1,6	0,6

Получено СКО 1,6 пиксель. Из анализа данных, приведенных в таблицах 2.3-2.5 можно сделать вывод, что оба метода уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков дают близкие результаты.

Таким образом, результаты апробации разработанной методики подтвердили ее работоспособность и пригодность для решения практических задач по уточнению геодезической привязки космических снимков с целью создания высокоточных ортофотопланов.

Точность решения задачи уточнения геодезической привязки космических изображений по наземным опорным данным зависит не только количества этих данных, но и от их взаимного расположения. При уточнении геодезической привязки космических снимков по опорным точкам местности достаточно обеспечить их равномерное распределение по площади снимка. При использовании для этой цели отрезков прямых дополнительно необходимо обеспечить условие их непараллельности. В противном случае матрица системы нормальных уравнений становится плохо обусловленной, а поиск решения методом приближений становится неустойчивым.

Поэтому на следующем этапе экспериментальной проверки методики определялись условия, которым должны соответствовать направления отрезков прямых, используемых при уточнении геодезической привязки снимков. С той целью из 16 отрезков прямых, приведенных на рисунке 2.10, было выбрано 9 близких по направлению отрезков (Рисунок 2.11).

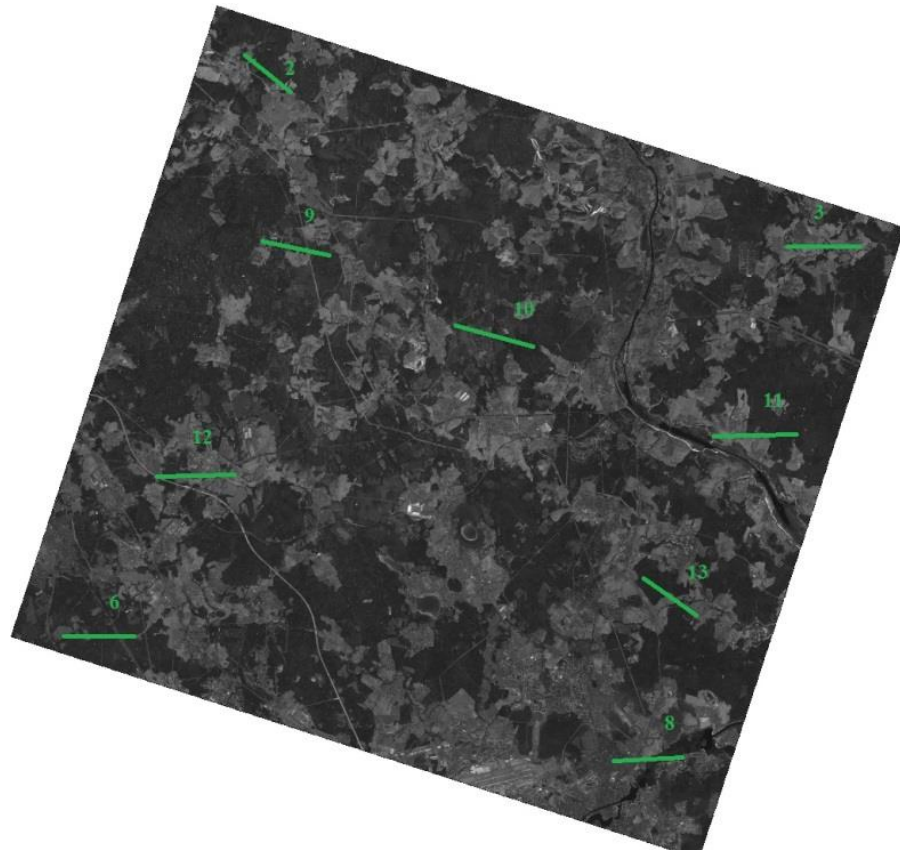


Рисунок 2.11 - Отрезки линейных объектов, имеющие приблизительно равное направление

По этим отрезкам уточнялась геодезическая привязка космического снимка КА ДЗЗ Ресурс–II путем определения параметров аффинных преобразований. Результаты полученного решения приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Невязки координат при уточнении геодезической привязки по «некорректно расположенным» отрезкам прямых

№ отрезка	ΔX (pix)	ΔY (pix)	ΔXY (pix)	Параметр t
OTR_2	-0,2	-0,7	0,7	-0,283
OTR_3	0,03	-0,1	0,1	-0,058
OTR_6	-0,2	0,2	0,2	-0,579
OTR_8	0,01	-0,4	0,4	1,697
OTR_9	0,02	0,04	0,05	0,134
OTR_10	0,2	0,8	0,8	-0,111
OTR_11	-0,1	0,3	0,3	0,171
OTR_12	0,3	0,5	0,6	0,131
OTR_13	-0,1	-0,6	0,6	0,403
Среднее квадратическое отклонение (СКО)	0,2	0,5	0,5	
Среднее арифметическое	0,0	0,0	0,4	
Максимальное	0,3	0,8	0,8	
Минимальное	-0,2	-0,7	0,05	

Оценка точности полученного решения представляется вполне удовлетворительной (СКО 0,5 пиксель). Однако обращает на себя внимание тот факт, что значение параметра t для некоторых отрезков выходит за допустимые пределы $0 < t < 1$. Это означает, что точка с координатами, вычисленными по формуле (1.13), лежит за пределами отрезка.

Для получения объективной оценки точности с полученными из решения параметрами преобразования были вычислены координаты контрольных точек, в качестве которых использовались 18 опорных точек местности. Невязки

координат на контрольных точках при ориентировании по «некорректно расположенным» отрезам прямых приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Невязки координат на контрольных точках при ориентировании по «некорректно расположенным» отрезам прямых

Номер Контрольной точки	ΔX (pix)	ΔY (pix)	ΔXY (pix)
1	-16,1	1,1	16,2
2	-4,2	-2,6	5,0
3	4,0	4,2	5,8
4	14,2	-2,1	14,4
5	-12,3	3,0	12,6
6	-5,7	1,6	5,9
7	-6,1	-1,7	6,4
8	-8,2	3,0	8,7
9	-2,1	0,2	2,1
10	6,2	3,8	7,2
11	12,7	1,2	12,8
12	5,6	0,8	5,7
13	-7,8	-1,8	8,0
14	8,5	-0,1	8,5
15	-3,9	2,5	4,6
16	2,9	0,2	2,9
17	-1,2	1,8	2,2
18	-1,3	1,7	2,1
Среднее квадратическое отклонение (СКО)	8,1	2,2	8,4
Среднее арифметическое	-0,8	0,9	7,3
Максимальное	14,2	4,2	16,2
Минимальное	-16,1	-2,6	2,1

Большие значения невязок свидетельствуют о том, что полученное решение является неудовлетворительным.

Для установления допустимого значения угла между направлениями отрезков прямых был проведен эксперимент, в котором уточнение геодезической

привязки снимка КА ДЗЗ WorldView выполнялось на основе преобразования типа «сдвиг» по двум отрезкам прямых. При этом рассчитывались углы между этими прямыми. Результаты эксперимента приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 - Точности геодезической привязки космического снимка по двум отрезкам линейных объектов

Первый отрезок	Второй отрезок	Угол между отрезками (град)	СКО _{XY} (pix)	V _{XY} (pix)	Первый отрезок	Второй отрезок	Угол между отрезками (град)	СКО _{XY} (pix)	V _{XY} (pix)
OTR_3	OTR_12	1°	21,6	22,4	OTR_1	OTR_13	34°	1,2	2,0
OTR_8	OTR_18	2°	19,6	19,7	OTR_3	OTR_8	46°	1,2	2,0
OTR_13	OTR_17	3°	10,4	10,9	OTR_5	OTR_17	47°	0,78	1,2
OTR_11	OTR_19	5°	2,1	2,9	OTR_10	OTR_12	56°	1,0	1,5
OTR_12	OTR_20	6°	2,7	3,2	OTR_6	OTR_20	58°	2,0	2,8
OTR_3	OTR_20	7°	2,5	3,3	OTR_4	OTR_17	60°	1,8	2,4
OTR_1	OTR_5	9°	2,5	3,3	OTR_1	OTR_16	68°	1,0	1,5
OTR_13	OTR_14	11°	1,2	1,9	OTR_4	OTR_13	80°	1,9	2,7
OTR_3	OTR_17	15°	2,8	3,4	OTR_4	OTR_17	76°	1,8	2,4
OTR_4	OTR_10	30°	4,7	5,6	OTR_5	OTR_9	83°	1,1	1,8
OTR_13	OTR_18	32°	2,0	2,6	OTR_14	OTR_16	89°	1,1	1,8
OTR_3	OTR_5	32°	1,7	2,5	OTR_12	OTR_16	90°	0,86	1,4
OTR_5	OTR_14	32°	1,6	2,3	OTR_3	OTR_16	90°	1,26	1,8

Анализ данных таблицы 2.8 показывает, что точность решения повышается с увеличением угла между отрезками прямых. В результате можно заключить, что отрезки прямых, участвующие в решении задачи уточнения геодезической привязки космических снимков, должны иметь разные направления, при этом угол между направлениями не должен быть меньше 5° градусов.

Это условие должно обязательно соблюдаться при определении поправок типа «сдвиг» по минимальному числу отрезков (два отрезка) и при их

определении по картографическим данным, например по параллельным улицам прямоугольных кварталов. В остальных случаях это условие выполняется автоматически в силу хаотичности расположения линейных объектов местности, пригодных для уточнения геодезической привязки снимков.

2.5 Экспериментальная проверка технологии при использовании треков и опорных точек местности

При практической апробации разработанной технологии исследовалась возможность геодезической привязки зарубежных космических снимков сверхвысокого разрешения и космических снимков отечественного КА ДЗЗ «Ресурс-П» с использованием в качестве опорных данных точек местности и отрезков треков. Экспериментальные исследования проводились на двух тестовых участках: участок №1 - Дмитровский район Московской области; участок №2 – юго-западная часть территории Республики Крым (см. Разделы 2.5.1.- 2.5.2).

На территорию участка №1 были отобраны космические снимки, полученные КА ДЗЗ WorldView-2 размером 17x30 км с пространственным разрешением 0,5 м и КА ДЗЗ Ресурс-П с разрешением 0,8 м такого же размера. На территории покрытой снимками с использованием геодезической спутниковой аппаратуры в статическом режиме были определены координаты и высоты 12 опорных точек местности, равномерно распределенных по всей территории. Средняя квадратическая ошибка определения координат и высот ОТМ относительно постоянно действующей дифференциальной станции, расположенной в городе Лобня (код станции: LOBN) не превысила 0,05 м. На той же территории в кинематическом режиме [38] были определены геодезические треки со средней квадратической ошибкой не хуже 0,3 м. Регистрация треков выполнялась при движении автомобиля по краю дорожного покрытия с антенной, закрепленной с правой стороны крыши автомобиля. Измерения, произведенные таким способом, позволяют в дальнейшем минимизировать погрешности при измерении точек на проекциях отрезков треков на снимках.

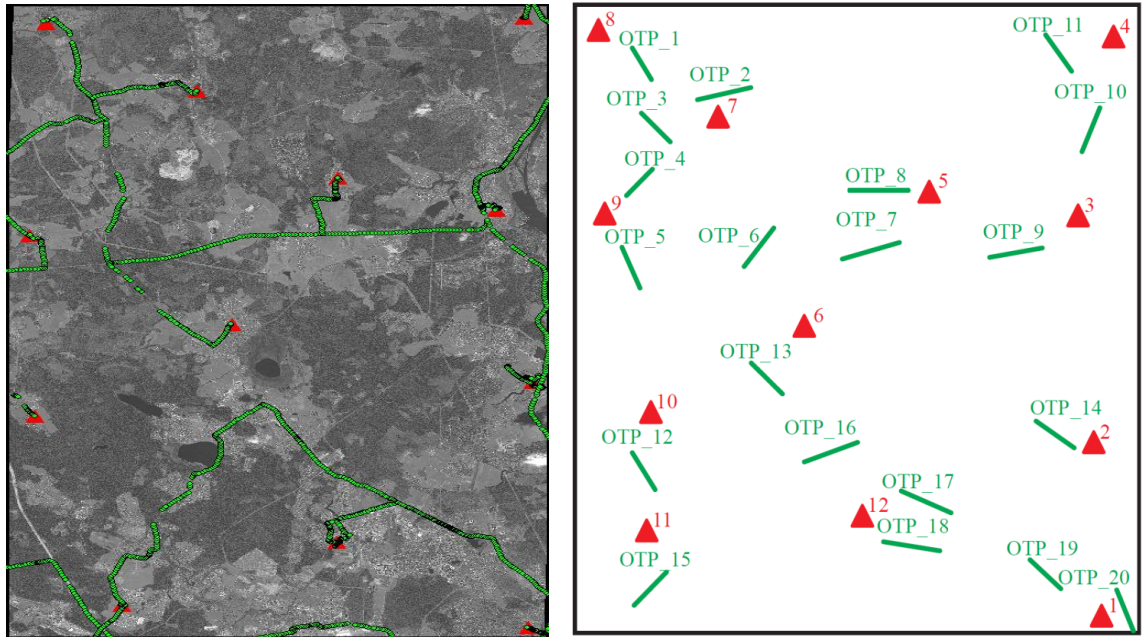


Рисунок 2.12 - Расположение треков и ОТМ на снимке и схематическом изображении в районе работ

Из записанных треков было выбрано 20 отрезков, равномерно распределенных по площади снимков. На рисунке 2.12 красные треугольники - ОТМ, а зеленые линии - треки и их прямолинейные отрезки.

При ориентировании космических снимков в ЦФС «Photomod» только по опорным точкам местности было установлено, что первичная точность (СКО) геодезической привязки снимков, обеспечиваемая моделью в виде RPC, для снимков КА ДЗЗ WorldView-2 и КА ДЗЗ Ресурс-П составляет 5,3 м и 11 м соответственно. При уточнении геодезической привязки снимков только по ОТМ с использованием преобразования типа «сдвиг» и аффинных преобразований для снимка КА ДЗЗ WorldView-2 точность геодезической привязки составила 0,8 пиксель (0,4м) и 0,6 пиксель (0,3м), а для снимка КА ДЗЗ Ресурс-П - 4,6 пиксель (3,7м) и 1,2 пиксель (1 м).

Для проверки технологии уточнения геодезической привязки по отрезкам прямых на участке №1 было выбрано 19 отрезков треков и 11 точек ОТМ (1 отрезок и 1 ОТМ плохо идентифицировались на снимке КА ДЗЗ WorldView-2, но использовались для снимка КА ДЗЗ Ресурс-П), равномерно расположенных на территории, покрытой изображением с учетом их хаотичной направленности

(Рис. 2.12). В соответствии с технологией использования отрезков треков для уточнения геодезической привязки космических снимков на изображении каждого отрезка дороги (на расстоянии 1-1,5 м от обочины), имеющего точки трека, на снимке измерялись точки внутри отрезка. Точность измерения оценивается на уровне 1-2 пиксель. Следует отметить, что ошибку измерения можно значительно уменьшить, если использовать вместо отрезков треков отрезки линейных объектов (например, край дорожного покрытия), граничные точки которых измеряют в статическом режиме.

По результатам измерений было выполнено уточнение модели *RPC* путем вычисления поправок типа «сдвиг», аффинных и полиномиальных поправок с использованием 19 отрезков и 11 опорных точек. Все исходные данные (ОТМ и отрезки треков) являлись опорными. В таблице 2.9 приведены значения невязок пиксельных координат ОТМ и точек отрезков, соответствующих определяемому параметру «*t*», полученные из уравнивания, выполненного в ПК «ГКСС».

Таблица 2.9 - Значения невязок координат опорных данных после уравнивания при определении параметров преобразований

(снимок КА ДЗЗ WorldView-2)

Название отрезка	Преобразования типа «сдвиг»			Аффинные преобразования			Полиномиальные преобразования		
	D_x (pix)	D_y (pix)	D_{xy} (pix)	D_x (pix)	D_y (pix)	D_{xy} (pix)	D_x (pix)	D_y (pix)	D_{xy} (pix)
OTR_5	-0,04	0,01	0,04	0,01	-0,02	0,02	-0,01	0,01	0,02
OTR_17	0,06	-0,08	0,10	-0,09	-0,05	0,11	0,03	0,01	0,03
OTR_12	-0,09	0,07	0,11	-0,06	0,11	0,12	-0,03	0,02	0,04
12	0,16	0,03	0,16	-0,13	-0,04	0,14	-0,08	-0,05	0,09
OTR_15	0,15	0,08	0,17	-0,09	-0,12	0,15	-0,07	0,09	0,12
OTR_16	-0,11	-0,14	0,18	-0,11	0,15	0,19	0,02	-0,17	0,17
9	0,08	-0,31	0,32	-0,20	-0,10	0,22	-0,23	0,03	0,23
5	-0,26	0,19	0,32	-0,22	0,09	0,24	0,18	-0,18	0,25
OTR_1	-0,34	0,10	0,36	-0,02	0,26	0,26	0,24	-0,06	0,25
OTR_8	-0,03	0,36	0,36	-0,23	0,18	0,29	0,25	0,11	0,27
OTR_20	-0,34	0,21	0,40	-0,34	0,04	0,35	-0,27	0,08	0,28

Продолжение таблицы 2.9

Название отрезка	Преобразования типа «сдвиг»			Аффинные преобразования			Полиномиальные преобразования		
	D _x (pix)	D _y (pix)	D _{xy} (pix)	D _x (pix)	D _y (pix)	D _{xy} (pix)	D _x (pix)	D _y (pix)	D _{xy} (pix)
8	0,14	0,44	0,46	-0,34	0,10	0,36	-0,26	-0,13	0,29
OTR_18	0,05	-0,46	0,47	-0,31	0,25	0,40	-0,22	0,18	0,29
OTR_9	0,01	0,48	0,48	-0,13	-0,42	0,45	0,00	0,32	0,32
OTR_14	-0,42	0,34	0,54	0,15	-0,46	0,48	0,10	0,38	0,39
OTR_13	-0,35	0,43	0,56	0,45	-0,25	0,52	-0,25	-0,32	0,41
10	0,61	-0,16	0,63	0,20	0,49	0,53	-0,35	0,22	0,42
OTR_3	-0,50	0,41	0,65	-0,42	0,34	0,54	-0,36	0,28	0,45
OTR_19	-0,66	0,21	0,70	-0,46	0,29	0,54	-0,45	0,18	0,49
4	-0,36	-0,68	0,77	-0,35	0,43	0,56	-0,38	0,31	0,49
OTR_10	-0,73	-0,24	0,77	-0,58	0,18	0,60	-0,32	0,40	0,51
OTR_11	-0,75	0,30	0,81	0,55	0,26	0,61	-0,50	0,15	0,52
6	0,63	-0,61	0,88	0,18	0,65	0,68	-0,03	-0,53	0,53
11	0,83	-0,39	0,92	0,26	-0,64	0,69	0,50	0,24	0,55
2	-0,67	-0,69	0,96	0,46	0,53	0,70	0,46	0,53	0,70
OTR_6	0,92	0,44	1,02	0,01	0,71	0,71	0,01	0,71	0,71
OTR_2	0,33	1,19	1,24	0,61	-0,46	0,77	0,61	-0,46	0,77
3	0,47	-1,21	1,30	0,57	-0,67	0,89	0,57	-0,67	0,89
1	0,26	-1,40	1,43	-0,32	-0,89	0,94	-0,32	-0,89	0,94
OTR_4	0,96	1,10	1,46	0,95	-0,94	1,34	0,95	-0,94	1,34
СКО	0,47	0,56	0,73	0,36	0,42	0,56	0,35	0,38	0,52

В данном случае оценка точности «комбинированного решения» (ОТМ и отрезки прямых) выполнялась только по невязкам координат исходных данных, поскольку все исходные данные были приняты в качестве опорных.

Из анализа данных таблицы 2.9 следует, что все решения получены примерно с одинаковой точностью. Повышенные значения невязок наблюдаются в случае преобразования типа «сдвиг» для опорных данных, расположенных в левом верхнем углу снимка, что может быть объяснено неравномерной аппроксимацией геометрии снимка прилагаемой к нему моделью геодезической привязки в виде RPC. Уточняющие модели геодезической привязки снимка в виде аффинных и полиномиальных преобразований эти недостатки RPC компенсируют.

Для оценки точностных возможностей технологии в случае ее применения с использованием в качестве опорных данных только отрезков прямых было выполнено уточнение геодезической привязки снимка КА ДЗЗ WorldView-2 с использованием геодезических координат (B, L, H) концов отрезков треков и измеренных пиксельных координат точек на изображениях отрезков треков на снимке.

При уточнении геодезической привязки вычислялись поправки типа «сдвиг», аффинные и полиномиальные поправки с использованием всех 19 отрезков. В качестве контрольных точек использовались опорные точки местности, измеренные на этом же снимке (всего 11 ОТМ). Статистические характеристики расхождений координат контрольных точек для разных видов преобразований приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 - Статистические характеристики расхождений координат на контрольных точках (снимок КА ДЗЗ WorldView-2)

	Поправки типа «сдвиг»		Аффинные поправки		Полиномиальные поправки	
СКО _x	0,513		0,706		0,649	
СКО _y	1,111		0,967		1,039	
СКО _{xy} (пиксель\м)	1,223	0,6	1,197	0,6	1,225	0,6
Максим. ошибка (пиксель\м)	1,9	0,95	1,8	0,90	1,9	0,95

Точностные характеристики уточненной геодезической привязки снимка КА ДЗЗ WorldView-2 для всех видов преобразований близки по величине, что свидетельствует о качестве первичной модели геодезической привязки снимка (RPC), которая хорошо описывает геометрию снимка. В таких случаях эффективно работают уточняющие модели геодезической привязки в виде поправок типа «сдвиг» и аффинных преобразований.

При проведении экспериментальных исследований со снимком КА ДЗЗ Ресурс-П (уровень обработки 2А), полученным на участок №1, первоначально

была выполнена оценка повышения точности геодезической привязки снимка с использованием преобразований типа «сдвиг» ОТМ. Среднее квадратическое отклонение координат контрольных точек составило 4,6 пиксель (3,7 метра), что свидетельствует о том, что для снимков КА ДЗЗ Ресурс-П применения уточняющих преобразований типа «сдвиг» недостаточно.

Для определения точностных характеристик уточнения геодезической привязки снимка КА ДЗЗ Ресурс-П с использованием аффинных и полиномиальных преобразований были выполнены эксперименты, аналогичные экспериментам, проведенным со снимком КА ДЗЗ WorldView-2. При уточнении геодезической привязки снимка КА ДЗЗ Ресурс-П использовались те же опорные данные, что и при уточнении геодезической привязки снимка КА ДЗЗ WorldView-2.

Результаты уточнения геодезической привязки снимка КА ДЗЗ Ресурс-П при совместном использовании в качестве опорных данных отрезков треков и опорных точек местности приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 - Значения невязок координат опорных данных после уравнивания при определении параметров преобразований (снимок КА ДЗЗ Ресурс-П)

Номера ОТР и ОТМ	Аффинные преобразования			Полиномиальные преобразования		
	D_x (pix)	D_y (pix)	D_{xy} (pix)	D_x (pix)	D_y (pix)	D_{xy} (pix)
OTR_1	-1,25	0,37	1,31	-0,78	0,23	0,82
OTR_2	0,08	0,29	0,31	0,01	0,05	0,05
OTR_3	-0,65	0,53	0,84	-0,32	0,27	0,42
OTR_5	-1,06	0,15	1,07	-0,81	0,11	0,82
OTR_6	-0,44	-0,21	0,49	-0,41	-0,20	0,46
OTR_7	-0,27	-0,64	0,69	-0,10	-0,24	0,26
OTR_8	0,12	-1,64	1,65	0,07	-0,97	0,97
OTR_9	-0,01	-0,86	0,86	-0,01	-0,42	0,42
OTR_10	0,23	0,07	0,24	0,12	0,04	0,13

Продолжение таблицы 2.11

Номера ОТР и ОТМ	Аффинные преобразования			Полиномиальные преобразования		
	D _X (pix)	D _Y (pix)	D _{XY} (pix)	D _X (pix)	D _Y (pix)	D _{XY} (pix)
ОТР_11	-0,40	0,16	0,43	-0,41	0,17	0,44
ОТР_12	-0,27	0,21	0,34	-0,23	0,17	0,29
ОТР_13	0,24	-0,29	0,38	-0,30	0,37	0,48
ОТР_14	-0,72	0,59	0,93	-0,70	0,57	0,91
ОТР_15	-0,01	0,00	0,01	-0,38	-0,21	0,44
ОТР_16	0,002	0,002	0,003	0,16	0,21	0,26
ОТР_17	0,05	-0,07	0,09	-0,24	0,34	0,41
ОТР_18	-0,02	0,13	0,13	-0,04	0,38	0,39
ОТР_19	-0,65	0,20	0,69	-0,32	0,10	0,34
ОТР_20	-0,89	0,55	1,05	-0,05	0,03	0,06
ОТМ 1	-0,26	0,77	0,81	0,17	-0,59	0,61
ОТМ 2	0,32	0,06	0,33	0,55	0,00	0,55
ОТМ 3	0,92	-0,85	1,25	0,77	-0,57	0,96
ОТМ 4	0,19	0,86	0,88	-0,09	0,40	0,41
ОТМ 5	0,48	-0,59	0,76	-0,07	-0,01	0,08
ОТМ 6	1,13	-0,30	1,17	0,65	0,47	0,80
ОТМ 7	0,68	-0,35	0,77	0,31	-0,37	0,48
ОТМ 8	0,86	1,23	1,50	1,28	-0,09	1,28
ОТМ 9	-0,64	0,40	0,75	-0,28	0,22	0,36
ОТМ 10	0,98	-0,74	1,23	1,12	-0,60	1,27
ОТМ 11	0,71	-0,03	0,71	0,29	-0,08	0,30
ОТМ 12	0,52	0,02	0,52	0,06	0,22	0,23
СКО	0,61	0,57	0,83	0,48	0,36	0,60

Сравнение данных таблиц 3.5 и 3.7 показывает, что значения СКО невязок (остаточных значений) в случае применения полиномиальных преобразований для снимков КА ДЗЗ WorldView-2 и КА ДЗЗ Ресурс-П имеют близкие значения. В случае применения аффинных преобразований СКО невязок для снимка КА ДЗЗ Ресурс-П в 1,5 раза больше, чем для снимка КА ДЗЗ WorldView-2, что может свидетельствовать о несоответствии модели RPC геометрии снимка КА ДЗЗ Ресурс-П. Из этого следует, что для обеспечения максимальной точности геодезической привязки снимков КА ДЗЗ Ресурс-П при достаточной плотности и

равномерности распределения опорных данных целесообразно применять полиномиальные преобразования.

При уточнении геодезической привязки снимка КА ДЗЗ Ресурс-П только по отрезкам треков (19 отрезков) в качестве контрольных также служили опорные точки местности. Результаты оценки точности геодезической привязки снимка с использованием аффинных и полиномиальных преобразований приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 - Расхождения координат на контрольных точках при уточнении модели RPC по отрезкам прямых с использованием аффинных и полиномиальных преобразований (снимок КА ДЗЗ Ресурс-П)

Номер контрольной ОТМ	Аффинные преобразования			Полиномиальные преобразования		
	D_X (pix)	D_Y (pix)	D_{XY} (pix)	D_X (pix)	D_Y (pix)	D_{XY} (pix)
1	0,23	0,83	0,86	-0,34	-2,36	2,38
2	0,87	0,38	0,95	0,43	-0,86	0,96
3	1,52	-0,37	1,57	0,97	-0,62	1,16
4	0,83	1,56	1,76	0,34	0,96	1,02
5	1,12	-0,23	1,14	0,36	0,33	0,49
6	1,76	-0,20	1,77	1,05	0,59	1,20
7	1,38	-0,03	1,38	0,88	-0,15	0,90
8	1,60	1,48	2,18	1,86	-0,67	1,97
9	0,07	0,42	0,42	0,26	-0,25	0,36
10	1,65	-0,91	1,88	1,62	-0,88	1,85
11	1,31	-0,32	1,35	0,64	-0,12	0,65
12	1,08	-0,01	1,08	0,12	-0,16	0,20
СКО	1,23	0,75	1,44	0,91	0,88	1,27

Сравнение точностных характеристик геодезической привязки снимков КА ДЗЗ WorldView-2 и Ресурс-П (Таблицы 2.10 и 2.12), при использовании аффинных и полиномиальных преобразований, показывает их близкие значения 1,20/1,44 и 1,22/1,27 (в пикселях). При этом в расхождениях координат на контрольных точках по оси «X» (Таблица 2.10) присутствует систематическая

составляющая (причина не установлена), при устранении которой результат оценки точности практически совпадут.

2.5.1 Уточнение геодезической привязки космического снимка КА ДЗЗ

Ресурс-П по отрезкам геодезических треков

При проведении экспериментальных исследований на участке №2 уточнение геодезической привязки выполнялось только с использованием автомобильных треков. Опорные точки местности использовались в качестве контрольных и в уточнении геодезической привязки снимков не участвовали. Экспериментальные исследования проводились с двумя видами автомобильных треков: треков полученных с использованием ГНСС-приемников геодезического класса точности - участок №2 (1), и треков, полученных с использованием автомобильного навигатора – участок №2 (2).

Для уточнения геодезической привязки по отрезкам треков был выбран снимок КА ДЗЗ Ресурс-П (30 × 30 км), полученный на южную часть полуострова Крым (участок №2 (1)) с разрешением на местности 0,8 м. Первичная точность (СКО) геодезической привязки снимка, обеспечиваемая моделью в виде RPC, составила 9 метров. На этой территории геодезическим спутниковым оборудованием (ГНСС-приемник Trimble R7) в дифференциальном статическом режиме были определены координаты и высоты 26 опорных точек местности с СКО определения координат 0,05 м и в дифференциальном кинематическом режиме [38] определены траектории движения (треки) антенны ГНСС приемника, установленного на автомобиле, с СКО точек трека 0,3 м. Треки и ОТМ равномерно распределены по площади снимка (Рисунок 2.13) Из треков выбраны прямолинейные участки - 14 отрезков треков, для каждого из которых получены геодезические координаты (B, L, H) крайних точек.

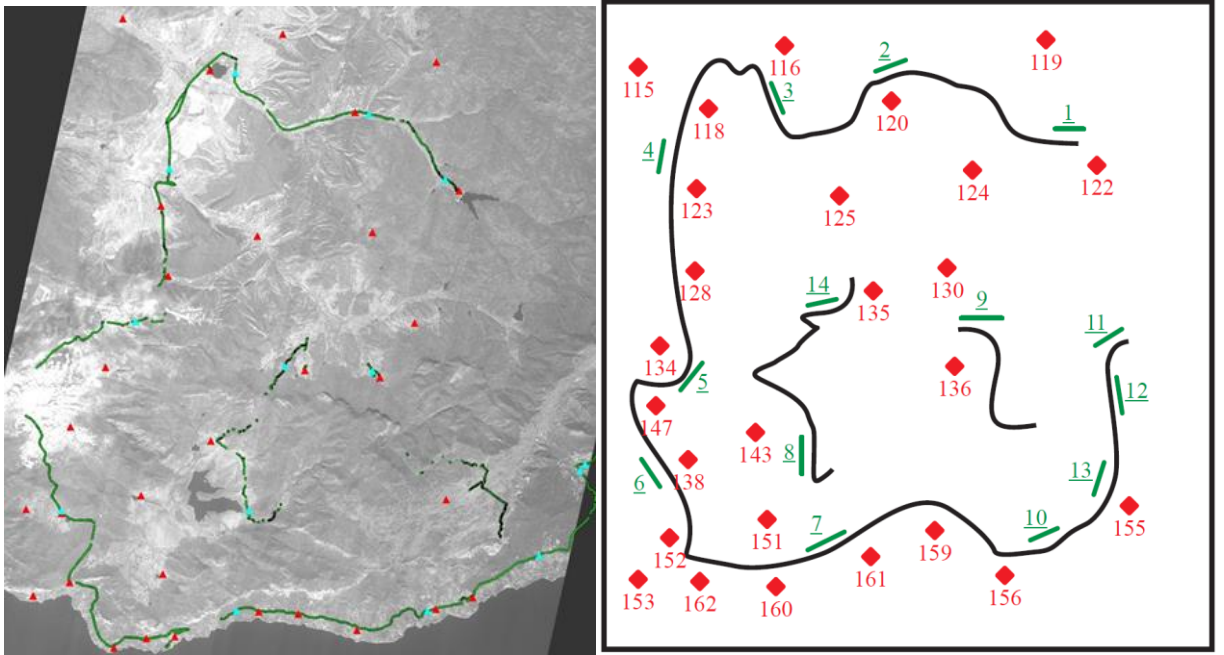


Рисунок 2.13 - Схематическое расположение треков, ОТМ (красные ромбы) и отрезков треков (зеленые отрезки) на территории участка №2 (1)

Уточнение геодезической привязки снимка КА ДЗЗ Ресурс-П выполнялось по отрезкам геодезических треков с использованием аффинных преобразований. Результаты уравнивания приведены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 - Результаты уравнивания при определении параметров аффинных преобразований по отрезкам геодезических треков

(снимок КА ДЗЗ Ресурс-П)

Номер отрезка	vX (pix)	vY (pix)	V_{xy} (pix)	Параметр t	СКО t
OTR_1	0,02	-0,1	0,1	0,610	0,018
OTR_2	-0,003	0,1	0,1	0,525	0,010
OTR_3	0,7	0,1	0,7	0,531	0,009
OTR_4	-1,1	-0,03	1,1	0,505	0,009
OTR_5	0,1	0,4	0,4	0,545	0,007
OTR_6	1,0	-0,6	1,1	0,525	0,010
OTR_7	-0,03	-0,03	0,05	0,635	0,012
OTR_8	-1,3	0,4	1,3	0,544	0,008
OTR_9	1,1	-0,1	1,1	0,510	0,017
OTR_10	0,03	0,2	0,2	0,328	0,010
OTR_11	-0,1	-0,8	0,8	0,505	0,014
OTR_12	-0,2	0,1	0,2	0,540	0,010
OTR_13	0,3	0,5	0,5	0,545	0,010
OTR_14	-0,4	-0,1	0,4	0,656	0,026
СКО	0,67	0,32	0,74		

Из данных таблицы 2.13 следует, что СКО невязок составляет 0,74 пиксель, что можно считать вполне удовлетворительной точностью определения искомым параметров – коэффициентов аффинных преобразований и значений параметра t для каждого отрезка.

Независимая оценка повышения точности геодезической привязки с использованием аффинных преобразований выполнялась по разностям координат ОТМ, которые использовались только в качестве контрольных. Результаты оценки точности приведены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 - Оценка точности геодезической привязки по опорным точкам местности на участке №2 (1) (снимок КА ДЗЗ Ресурс-П)

Невязки на ОТМ при ориентировании по трекам			
Номер ОТМ	vX (pix)	vY (pix)	vXY (pix)
128	-0,2	-0,2	0,3
115	0,1	0,3	0,4
130	-0,4	0,0	0,4
136	0,4	-0,2	0,5
124	-0,5	0,02	0,5
147	0,6	-0,1	0,6
125	-0,5	0,4	0,7
135	0,1	-0,7	0,7
155	0,02	-0,9	0,9
123	-0,5	0,9	1,0
122	-1,0	-0,1	1,0
116	-1,0	0,2	1,0
156	1,1	-0,3	1,2
119	-1,0	0,7	1,2
143	0,8	-0,9	1,2
134	1,1	-0,6	1,2
138	0,9	-0,9	1,2
120	-1,3	0,01	1,3
151	1,1	-0,7	1,4
160	1,3	-0,6	1,4
162	1,4	0,1	1,4
118	-1,1	0,9	1,4
159	1,6	0,1	1,6
161	1,7	0,3	1,7
153	1,9	0,1	1,9
152	2,0	0,5	2,1
СКО	1,0	0,5	1,1

Полученные оценки точностных характеристик повышения точности геодезической привязки путем определения параметров аффинных преобразований по отрезкам геодезических треков (СКО 1,1 пиксель) совпадают с

результатами, полученными для таких же условий (Таблица 2.12) при проведении экспериментов на участке №1.

2.5.2 Уточнение геодезической привязки космического снимка КА ДЗЗ «Ресурс-П» по отрезкам навигационных треков

Для проверки возможности ориентирования снимков по автомобильным навигационным трекам был выбран снимок КА ДЗЗ Ресурс-П с разрешением на местности 0,8 м на район (30 × 30 км) расположенный в восточной части Крымского полуострова – участок №2 (2). Первичная точность (СКО) геодезической привязки снимка, обеспечиваемая моделью в виде RPC, составила 9 метров. Для записи треков использовался навигатор Garmin. Высоты, записанные навигатором, были заменены высотами из цифровой модели рельефа (SRTM), так как ошибки высот, определяемых автомобильными навигаторами, могут достигать 10 м и более. Для геодезической привязки были выбраны 16 отрезков треков. Отрезки выбирались на прямолинейных участках дорог, без застройки и растительности на обочинах, которые припятствовали бы прохождению сигналов от навигационных спутников (Рисунок 2.14).

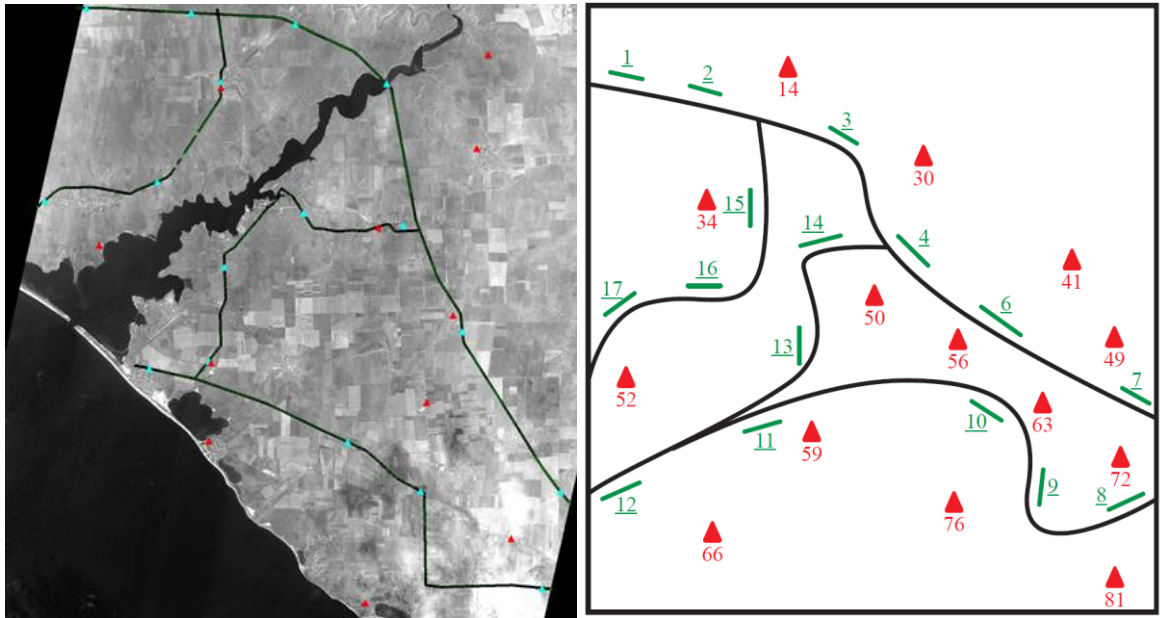


Рисунок 2.14 - Схематическое расположение треков, ОТМ (красные ромбы) и отрезков треков (зеленые отрезки) на территории участка №2 (2)

Как и в случае с геодезическими треками уточнение геодезической привязки космического снимка КА ДЗЗ Ресурс-П по отрезкам навигационных треков выполнялось с использованием аффинных преобразований. Результаты уравнивания приведены в таблице 2.15.

Таблица 2.15 - Результаты уравнивания при определении параметров аффинных преобразований по отрезкам навигационных треков (снимок КА ДЗЗ Ресурс-П)

Номер отрезка	vX (pix)	vY (pix)	vXY (pix)	Параметр t	СКО t
OTR_1	-0,03	-1,9	1,9	0,524	0,035
OTR_2	-0,1	1,6	1,6	0,484	0,036
OTR_3	-0,1	0,3	0,3	0,475	0,035
OTR_4	0,5	-0,5	0,7	0,473	0,050
OTR_6	-0,8	0,1	0,8	0,522	0,041
OTR_7	-0,1	0,1	0,1	0,524	0,051
OTR_8	0,1	-0,7	0,7	0,588	0,066
OTR_9	-0,3	0,5	0,6	0,544	0,062
OTR_10	0,2	-0,6	0,6	0,472	0,039
OTR_11	-0,2	0,8	0,8	0,518	0,089
OTR_12	0,5	0,4	0,6	0,380	0,048
OTR_13	0,7	-0,02	0,7	0,496	0,036
OTR_14	0,3	-0,2	0,3	0,543	0,042
OTR_15	-0,4	-0,02	0,4	0,462	0,031
OTR_16	0,5	1,1	1,2	0,413	0,044
OTR_17	-0,8	-1,0	1,3	0,542	0,049
СКО	0,43	0,82	0,93		

Независимая оценка повышения точности геодезической привязки выполнялась также по разностям координат ОТМ, которые использовались только в качестве контрольных. Результаты оценки точности приведены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 - Оценка точности геодезической привязки по контрольным точкам на участке №2 (2) (снимок КА ДЗЗ Ресурс-П)

Невязки на ОТМ при ориентировании по трекам			
Номер точки КТМ	νX (pix)	νY (pix)	νXY (pix)
10	-0,2	-0,5	0,6
14	0,4	1,4	1,5
30	-0,6	0,6	0,9
34	1,5	0,1	1,5
41	0,2	0,3	0,3
49	-2,4	0,5	2,5
50	0,1	-1,7	1,7
52	0,9	0,1	0,9
56	-1,5	-0,8	1,7
59	1,6	-2,0	2,6
63	-1,4	-2,2	2,6
66	2,9	-2,5	3,8
72	-1,1	0,1	1,1
76	2,6	-0,4	2,6
81	-0,05	-0,7	0,7
СКО	1,5	1,3	1,9

Результаты уточнения геодезической привязки космического снимка КА ДЗЗ Ресурс-П с использованием навигационных треков (1,9 пиксель) уступают аналогичным результатам, полученным с использованием геодезических треков (1,1 пиксель). Однако и они могут считаться приемлемыми в случае полного отсутствия других видов опорных данных. Кроме этого, они вполне пригодны для уточнения геодезической привязки космических снимков с меньшим разрешением, например для космических снимков КА ДЗЗ Канопус-В.

2.5.3 Оценка влияния состава опорных данных на точность геодезической привязки

Оценка возможностей разработанной технологии выполнялась на значительном объеме опорных данных. Вместе с тем на практике не всегда можно обеспечить космический снимок опорными данными в таком количестве. С целью определения оптимального соотношения между количеством отрезков и ОТМ при их совместном использовании для вычисления аффинных поправок были выполнены экспериментальные исследования с использованием космического снимка КА ДЗЗ Ресурс-П.

Возможные схемы расположения ОТМ и отрезков линейных объектов (отрезков треков) приведены на рисунках 2.15(а-д).

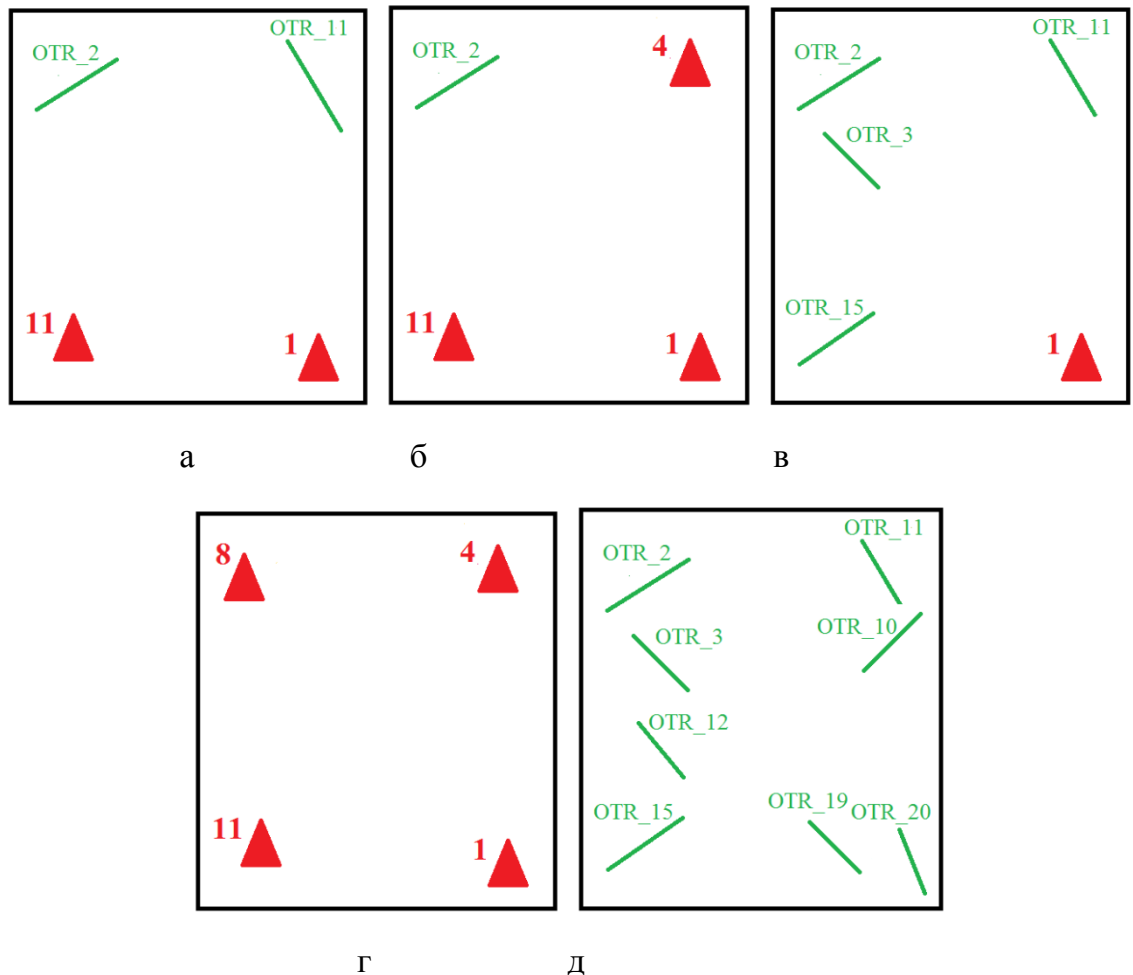


Рисунок 2.15 - Возможные схемы расположения ОТМ и линейных объектов (отрезков треков)

Результаты оценки точности геодезической привязки снимка КА ДЗЗ Ресурс-П по опорным данным, отмеченным на рисунках 2.15 (а-д), полученные с использованием опорных точек, которые использовались в качестве контрольных и в решении не участвовали, приведены в таблице 2.17.

Таблица 2.17 - Статистические характеристики расхождения координат на опорных точках при различном составе и расположении опорных данных

Рисунок	а		б		в		г		д	
СКО _x (пиксель)	0,68		0,72		1,16		0,68		1,12	
СКО _y (пиксель)	0,85		0,91		0,93		1,11		1,27	
СКО _{xy} (пиксель/м)	1,09п	0,87м	1,16п	0,93м	1,49п	1,17м	1,31п	1,05м	1,69п	1,35м
Максим. ошибка (пиксель/м)	1,88п	1,5м	1,92п	1,54м	2,24п	1,79м	1,94п	1,55м	2,6п	2,08м

Результаты, приведенные в таблице 2.17, показывают, что на минимальном составе опорных данных точность геодезической привязки космических снимков при совместном использовании отрезков прямых и ОТМ выше. Вместе с тем повышение точности геодезической привязки достигается и при использовании только одних отрезков прямых.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований по проверке разработанной технологии показали ее работоспособность и возможность повышения точности геодезической привязки космических снимков как по отрезкам прямых, так и в сочетании их с опорными точками местности. При этом в качестве отрезков прямых могут использоваться автомобильные треки, как геодезического класса точности, так и навигационные треки.

Из анализа полученных данных следует, что использование разработанной технологии обеспечивает геодезическую привязку зарубежных и отечественных снимков по отрезкам линейных объектов (треков) и опорных точек местности с точностью достаточной для создания ортофотопланов масштаба 1:10000.

Разработанная технология была апробирована в опытных производственных работах по геодезической привязке космических снимков на территории городов Омск, Нижний Тагил, Каменск-Уральский, Ставрополь, Иваново и территории Республики Крым.

Во время проведения экспериментальных исследований разработанной методики было 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 [5]. Если выполнять измерение точки грани здания, которая находится на крыше дома, высота здания определится по формуле:

$$H = H_1 + t \cdot (H_2 - H_1), \quad (2.15)$$

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 (2.1).

Имея в наличии в качестве исходных материалов ортофотопланы построенные по обычной технологии с использованием ЦМР или ортофотопланы построенные по технологии «TRUE ORTHO» с использованием цифровой модели местности (ЦММ), ЦМР и наклонные снимки на район работ можно определять высоты строений по описанной в статье технологии. Точность определения высот строений будет зависеть от пространственного разрешения и угла наклона снимка. Экспериментально было определено, что для определения высот строений с точностью 1-2 метра пространственное разрешение снимка не должно превышать 1 метр и общий угол наклона снимка должен быть больше 20 градусов.

Предложенный метод определения высот строений может применяться при создании трехмерных моделей городских территорий.

2.6 Оценка экономической эффективности технологии планово-высотной подготовки с использованием линейных объектов

Наиболее значимым результатом применения разработанной технологии является то, что при ее использовании можно повысить точность геодезической привязки космических снимков в тех случаях, когда традиционная технология, предполагающая использование ОТМ, вообще не может быть применена из-за отсутствия контурных точек. Такая ситуация часто возникает при использовании космических снимков с разрешением 2 м и хуже, на которых не распознаются мелкие детали.

Эффективность применения разработанной технологии уточнения геодезической привязки космических снимков с разрешением лучше 2 м достигается за счет расширения состава опорных данных, путем введения в него линейных объектов. Практическим результатом является снижение трудозатрат на выполнение полевых работ по определению координат опорных точек местности. Исходя из этого, оценку экономической эффективности разработанной технологии выполним на основе сравнения трудозатрат на выполнение полевых геодезических работ по определению координат опорных данных: ОТМ, в случае применения традиционной технологии уточнения геодезической привязки космических снимков, и отрезков треков, при применении разработанной технологии.

Рассмотрим состав затрат времени на выполнение полевых геодезических работ для геодезической привязки снимка КА ДЗЗ Ресурс-П размером 40x50 км. Для точной геодезической привязки такого снимка необходимо определить координаты 10-ти опорных точек местности (углы заборов, бордюрные камни, углы мемориальных сооружений и т. д.), равномерно распределенных по площади снимка. Статистика затрат времени на полевые работы по планово-высотной подготовке, проводимых с использованием спутниковой геодезической аппаратуры, свидетельствует о том, что на площади района работ в 2000 км², для этого потребуется два дня работы полевой бригады, состоящей из двух человек. При 8-ми часовом рабочем дне, перемещаясь по территории на автотранспорте,

бригада будет определять 5 ОТМ в день, при условии, что время измерения одной ОТМ, с учетом установки и снятия оборудования, не более 45 минут. Соответственно, на выполнение всего объема работ потребуется 2 рабочих дня или 32 технико/часа.

Для выполнения соизмеримой по точности геодезической привязки космического снимка на территорию площадью 2000 кв. км потребуется 15 - 20 отрезков прямых (участков треков). Время их определения при движении на автомобиле с автоматической записью геодезических треков примерно равно времени перемещения от одной ОТМ к другой. Поэтому экономия времени будет достигаться за счет того, что в этом случае не будет затрат времени на ГНСС измерения на ОТМ, которое в сумме, для нашего случая, составит 7,5 часов (15 технико/часов на всю бригаду), т. е. 47% времени от затрат времени на полевые работы по определению координат ОТМ. Кроме этого, работы по определению автомобильных треков в обжитой местности может выполнять один специалист. Это позволит сократить время выполнения полевых работ до 8,5 часов.

Эффективность работ по уточнению геопривязки космических снимков с разрешением хуже 2-х метров может быть значительно повышена за счет замены полевых работ по определению координат опорных данных на камеральные работы. В этом случае, в качестве опорных данных будут использоваться отрезки прямых, координаты крайних точек которых определены по крупномасштабным картографическим материалам. Технология подготовки таких опорных данных будет сводиться к измерению на исходной картографической основе плановых координат точек краев дорог, набережных, мостов и т. п., а также к расчету высот этих точек по цифровой модели рельефа местности. В этом случае затраты времени на планово-высотную подготовку снимков будут в большей степени зависеть от времени подготовки исходных картматериалов.

Эффективность такого подхода будет наиболее высока на территории полностью покрытой крупномасштабной картографической основой. Работы по созданию такой картографической основы на территорию Российской Федерации

(Единая электронная картографическая основа – ЕЭКО) ведутся в рамках национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации».

Таким образом, можно заключить, что применение разработанной технологии позволит значительно сократить затраты времени на планово-высотную подготовку космических снимков и обеспечить повышение точности их геодезической привязки в условиях отсутствия твердых контуров, используемых в традиционной технологии геодезической привязки космических снимков.

Выводы по второму разделу

Разработанная методика уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков позволяет выполнять геодезическую привязку зарубежных и отечественных снимков с использованием опорных точек местности, отрезков линейных объектов и отрезков треков. Методика содержит требования к составу, количеству и пространственному распределению опорных данных.

Выполнена экспериментальная проверка методики с оценкой точности полученных решений на контрольных данных, показавшая ее работоспособность и возможность выполнения геодезической привязки космических сканерных снимков с точностями достаточными для создания ортофотопланов масштаба 1:10000. Выполненное по отрезкам уточнение геодезической привязки снимка КА ДЗЗ «Ресурс-П», характеризуется точностью (СКО) 1,4 пиксель, что сопоставимо с точностью геодезической привязки снимков по опорным точкам местности.

Использование сочетания векторных опорных данных (ОТМ, отрезков линейных объектов и отрезков треков) 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.

Экспериментально установлены требования разнонаправленности отрезков прямых, используемых при уточнении параметров геодезической привязки космических сканерных снимков.

Выполнена оценка эффективности применения технологии уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков по линейным объектам, которая показала значительное сокращение затрат времени на планово-высотную подготовку снимков. При использовании треков в качестве элементов планово-высотной основы достигается значительная экономия временных и финансовых затрат.

РАЗДЕЛ 3. Технология повышения точности геодезической привязки космических снимков по опорным данным

3.1 Описание технологии

Применение разработанной методики уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков по векторным данным (отрезкам линейных объектов, отрезкам треков, как совместно с ОТМ, так и отдельно) позволяет расширить состав наземных опорных данных используемых при определении параметров преобразования, дополняющих исходную математическую модель геодезической привязки снимков в виде RPC. С расширением состава наземных опорных данных возникает вопрос о способах их определения с целью максимально эффективного использования разработанной методики. Наибольшая эффективность применения разработанной методики, реализующей подход к ориентированию снимков по отрезкам линейных объектов, проявляется тогда, когда в обеспечиваемом районе полностью отсутствуют или имеются в малом количестве контурные точки, используемые в качестве ОТМ, но при этом имеются четкие линейные объекты. Другим направлением повышения эффективности выполняемых работ с использованием предлагаемого подхода является сокращение затрат времени и денежных средств на полевую планово-высотную подготовку района. Исходя из этих положений, разрабатывалась технология уточнения геодезической привязки космических снимков по опорным данным, которая ориентирована на использование в качестве опорных данных прямолинейных участков дорог и полученных для них точных или навигационных GPS/ГЛОНАСС треков [21, 37, 39] представляющих собой упорядоченную последовательность точек местности на заданном маршруте, координаты которых определены с использованием ГНСС аппаратуры навигационного или геодезического классов точности. При этом сохраняется возможность использования в качестве опорных данных ОТМ, определенных геодезическими методами, и других геопространственных данных, по которым

могут быть получены координаты точечных объектов и крайних точек отрезков прямых, например, таких как крупномасштабные топографические планы, ортофотопланы, цифровые модели рельефа, данные воздушного лазерного сканирования, материалы тахеометрической съемки и другие.

Конечным продуктом разработанной технологии являются ортофотопланы, создаваемые по космическим сканерным снимкам высокого разрешения с математической моделью геодезической привязки в виде RPC. Технология предусматривает использование двух программных комплексов: цифровая фотограмметрическая система (ЦФС) «Photomod» и программный компонент геодезической привязки космических сканерных снимков по векторным данным (ПК ГКСС), разработанный в АО «НИИ ТП».

Исходными материалами являются космические сканерные снимки высокого разрешения (WorldView, GeoEye, SPOT, Pleiades, Ресурс-П и т. п.) [30, 34, 35]. Опорными данными являются элементы планово-высотной основы, состоящие из ОТМ, отрезков линейных объектов местности и отрезков навигационных треков. ПК ГКСС представляет собой 32-разрядное Windows-приложение и функционирует в 32/64-разрядных операционных средах Windows 7/8/10. совместно с ЦФС ««Photomod»».

В ЦФС ««Photomod»» выполняются следующие операции:

1. Измерение на снимке пиксельных координат ОТМ и точек, принадлежащих отрезкам линейных объектов.
2. Ориентирование космического снимка.
3. Построение ортотрансформированного изображения.

Измерение опорных точек и точек отрезков линейных объектов и точек отрезков треков на снимке выполняется в ЦФС «Photomod», поэтому предварительно необходимо выполнить следующие действия:

- создать проект в ЦФС «Photomod» в котором устанавливается система координат UTM и устанавливается номер зоны;
- выполнить загрузку исходного снимка с метаданными, содержащими RPC в проект ЦФС «Photomod»;

- создать ортофотоплан с использованием загруженного в проект снимка. Предварительно RPC модель снимка может быть уточнена с использованием 1-4 опорных точек. Приближенные координаты опорных точек могут быть получены в сервисах Google, Яндекс, Bing;

- в проект ЦФС «Photomod» загрузить ЦМР (высоты геодезические) на территорию покрывающую площадь снимка. В качестве ЦМР могут быть использованы глобальные ЦМР SRTM, ALOS_W3D, ArcticDEM, Aster DEM и др. Ортофотоплан строится в системе координат UTM. Далее ортофотоплан загружается в ГИС-программу (например, «Global Mapper»). На ортофотоплане опознаются объекты и выбираются отрезки линейных объектов и треков, которые будут использоваться для геодезической привязки снимков.

ПК «ГКСС» обеспечивает:

1. Загрузку, формирование и редактирование опорных данных.
2. Геодезическую привязку снимков с использованием векторных данных, в процессе которой выполняется определение поправок к RPC-полиномам типа «сдвиг», аффинные или полиномиальные.
3. Оценку точности полученного решения.
4. Определение геодезических координат точек отрезков линейных объектов, измеренных на снимке по формулам (1.17).
5. 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».
6. Расчет углов между направлениями, образованными линейными объектами;
7. Графическое отображение векторных опорных данных.

Технология создания ортофотопланов с уточненной геодезической привязкой космических сканерных снимков по векторным данным включает следующие основные процессы (см. Приложение А).

1. Анализ исходных снимков и создание проекта планово-высотной основы снимка. Выбор на снимке прямолинейных объектов местности, ОТМ, а также

оптимальных маршрутов для записи треков, пригодных для использования в качестве опорных данных (см. п.2.2.5). Основным условием выбора отрезков линейных объектов и треков являются то, чтобы отрезки должны располагаться равномерно по всей площади снимка или, по крайней мере, вблизи углов снимка и должны иметь разное направление.

2. Построение цифровой модели рельефа (ЦМР) в ЦФС «Photomod» по данным:
 - а) лидарной съёмки;
 - б) картографических материалов средних и крупных масштабов;
 - в) глобальных цифровых моделей высот (SRTM, ALOS_W3D, ArcticDEM и т. п.).
3. Полевые работы по определению координат ОТМ, крайних точек отрезков линейных объектов, запись треков. Координаты определяют геодезическим ГНСС-оборудованием, имеющим сертификат метрологической аттестации. Измерения проводят в дифференциальном режиме относительно постоянно действующих базовых станций. 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, 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 точек треков, предназначенных для измерения на снимке в ЦФС «Photomod». Для точек линейных объектов и точек треков вычисляются координаты точки на середине отрезка для удобства измерения в ЦФС «Photomod».
7. Создание проекта ЦФС «Photomod» в проекции UTM. Загрузка в проект ЦФС «Photomod» космических снимков, координат ОТМ, координат точек линейных объектов и отрезков треков в проекции UTM.

8. Измерение пиксельных координат ОТМ 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 ОТМ, точек линейных отрезков или треков в формате РАТ-В ЦФС «Photomod».
10. Импорт измерений из формата РАТ-В ЦФС «Photomod» в проект ПК «ГКСС» и формирование файла ОТМ (в формате «*Name, Хизм, Уизм, В, L, Н*», где *Хизм, Уизм* - измеренные пиксельные координаты точки на снимке, *В, L, Н* - геодезические координаты точки на местности), и координат точек линейных отрезков или треков (в формате «*Name, Хизм, Уизм, В1, L1, Н1, В2, L2, Н2*», где *Хизм, Уизм* - измеренные пиксельные координаты точки отрезка на снимке, а *В1, L1, Н1, В2, L2, Н2* - геодезические координаты граничных точек отрезка линейного объекта или трека) во внутреннем формате ПК «ГКСС».
11. Ориентирование снимка в проекте ПК «ГКСС». Определение поправок к RPC (сдвиг, аффинные или полиномиальные поправки), и параметра t_j , определяющего положение измеренных точек на отрезке. Вычисление геодезических координат точек линейных отрезков, измеренных на снимке в ЦФС «Photomod». Вычисление геодезических координат точек отрезков, соответствующих параметру t_j ($j=1..n$), где n – количество отрезков и формирование файла РАТ-В для загрузки геодезических и измеренных координат опорных точек и точек отрезков в ЦФС «Photomod».
12. Оценка точности геодезической привязки снимка.
13. Экспорт измеренных и геодезических координат ОТМ и координат точек линейных объектов из ПК «ГКСС» в формате РАТ-В ЦФС «Photomod». Загрузка сформированных файлов опорных данных в проект ЦФС «Photomod».
14. Ориентирование снимка в ЦФС «Photomod» с вычислением поправок типа «сдвиг» или аффинных поправок.
15. Загрузка ЦМР в ЦФС «Photomod».

16. Изготовление ортофотоплана в ЦФС «Photomod».

В случае использования полиномиальных поправок в ПК «ГКСС», не реализованных в ЦФС «Photomod», процесс ортотрансформирования должен выполняться в программном комплексе, в котором реализовано использование поправок такого вида. Например, ПО «ТОВИ», разработанное в АО «НИИ ТП».

Основное отличие разработанной технологии от традиционной заключается в особенностях подготовки опорных данных, в состав которых входят отрезки линейных объектов и отрезки треков. Схема технологического процесса изготовления ортофотопланов с использованием программных комплексов ЦФС «Photomod», ПК «ГКСС» и ПО «ТОВИ», представлена на рисунке 3.1.

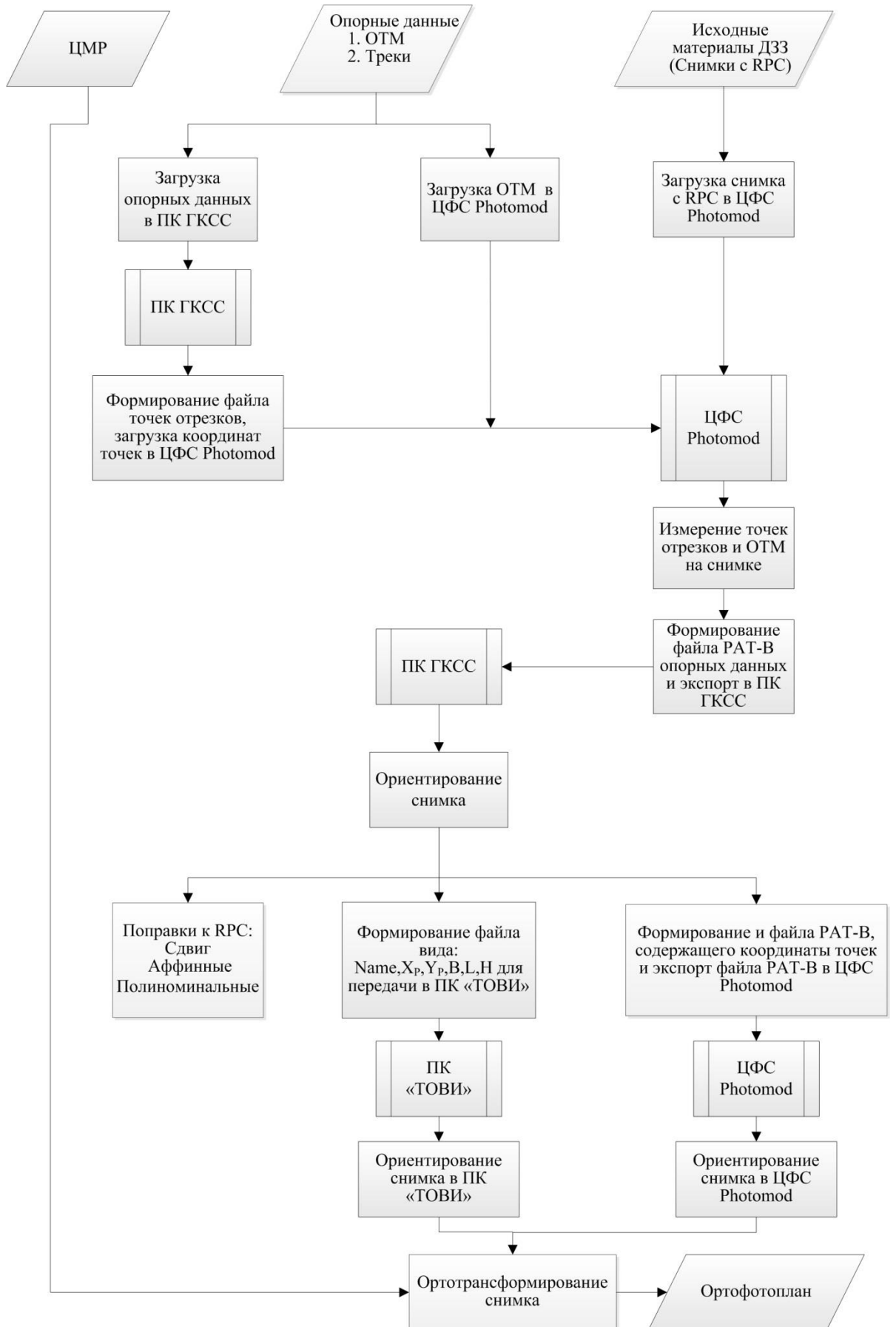


Рисунок 3.1 - Технологическая схема подготовки и использования опорных данных при создании ортофотопланов

Разработанная технологическая схема апробирована в ходе экспериментальных исследований по уточнению геодезической привязки космических сканерных снимков и экспериментальных работ по созданию ортофотопланов. Поскольку ортотрансформирование космических снимков это хорошо отработанный технологический процесс, основное внимание при апробировании технологии уделялось процессам уточнения геодезической привязки одиночного космического снимка с использованием опорных данных разного вида.

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 был отобран снимок Ресурс-П (уровень обработки 2А) [12] 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. СКО определения плановых координат и высот не превысило 0,05м. Также, в кинематическом, дифференциальном режиме были записаны траектории движения автомобиля (треки) с СКО точек трека 0,3м (Рисунок 3.2). Регистрация треков выполнялась при движении автомобиля с антенной спутникового геодезического приемника, 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.

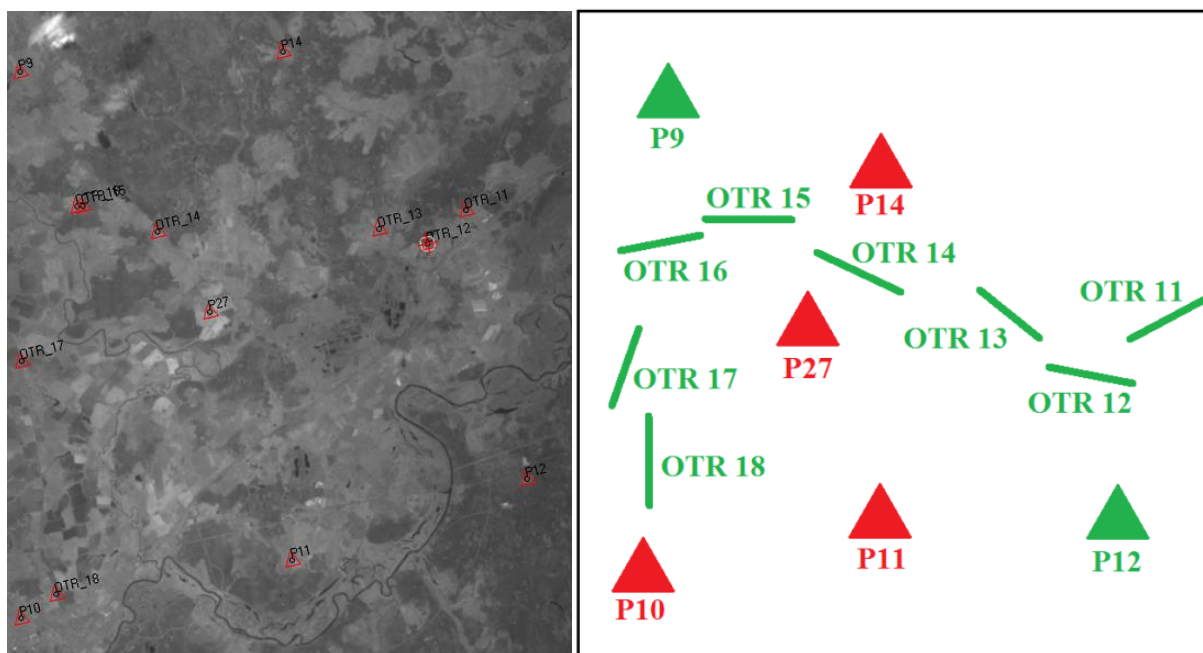


Рисунок 3.2 - Схема расположения отрезков треков, ОТМ (зеленые отрезки и треугольники) и контрольных точек (красные треугольники) на снимке

В ПК «ГКСС» была 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, на котором в ПО «Global Mapper» были измерены координаты 6 ОТМ и выполнено сравнение с исходными координатами, измеренными спутниковым GPS-оборудованием. Результаты сравнения приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - 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-измерения	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 3.1, видно, что расхождения координат ОТМ, измеренных на ортофотоплане, созданном с использованием векторных данных (отрезкам треков и ОТМ), с координатами, измеренными высокоточным GPS-оборудованием, не превышают 1,3 м.

В завершении, на созданный ортофотоплан были загружены редуцированные координаты отрезков треков. При визуальном анализе выявлено, что все точки расположены на обочинах дорог (погрешность 1 пиксель).

3.2 Перспективы развития разработанной технологии

Использование линейных объектов в качестве опорных данных при уточнении геодезической привязки космических снимков с моделью геодезической привязки 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 плоских и пространственных кривых – нелинейных объектов.

За рубежом в начале 80-х годов прошлого столетия европейскими и американскими учеными [74, 76, 77] были разработаны алгоритмы и методики применения нелинейных объектов местности для ориентирования стереопар. В качестве элементов планово-высотной основы предлагалось использовать объекты круглой, эллиптической и параболической формы, распознанные и интерпретированные на изображении, которые полностью или частично можно было бы описать набором точек.

Математические основы методики, разработанной в диссертационной работе применительно к линейным объектам, позволяют распространить полученное решение на плоские и пространственные кривые. На местности в качестве таких кривых могут использоваться объекты круглой формы [48] - клумбы, бассейны, дорожная разметка в местах организации кругового движения и т. п., а также изгибы дорог, рек, ограждений и т. п. При использовании в качестве опорных данных отрезков кривых следует применять тот же принцип поиска решения задачи установления соответствия точек объектов местности точкам их изображений на снимке. При этом, как и в случае с отрезками прямых, координаты соответственных точек необходимо определять под условием их принадлежности отрезкам кривых, которые описываются математическими зависимостями, представленными в параметрическом виде. В этом случае все методические решения будут совпадать с решениями, полученными для линейных объектов, но при этом потребуется большее количество точек, измеряемых на кривой по сравнению с двумя точками, измеряемыми на концах отрезков прямых.

Возможность предлагаемого решения покажем на примере окружностей и объектов параболической формы [24, 31].

В параметрическом виде уравнение окружности представляется зависимостью:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + R \cdot \cos(t); \\ Y &= Y_0 + R \cdot \sin(t), \quad 0 \leq t \leq 2\pi. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Как и в случае с линейными объектами на небольших по площади участках плоские прямоугольные координаты можно заменить нормированными геодезическими координатами B, L . Для нелинейных объектов в виде окружностей или фрагментов объектов, которые можно описать частью окружности, уравнения связи измеренных и определяемых параметров будут иметь вид:

$$\begin{aligned} (B(t) - B_0)^2 + (L(t) - L_0)^2 &= R^2; \\ B(t) &= B_0 + R \cdot \cos(t); \\ L(t) &= L_0 + R \cdot \sin(t), \quad 0 \leq t \leq 2\pi, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где $B(t), L(t)$ - геодезические координаты точки принадлежащей окружности, а (B_0, L_0) - координаты центра окружности; R - радиус окружности, описывающей объект (Рисунок 3.3).

Представленная в таком виде окружность по определению лежит в одной плоскости. Предполагается, что это горизонтальная плоскость, поэтому высота всех точек окружности полагается одинаковой, т. е. $H = const$.

Неизвестными величинами в уравнениях (3.1-3.2) являются координаты центра и радиус окружности, которые определяются по трем точкам, измеренным на окружности.

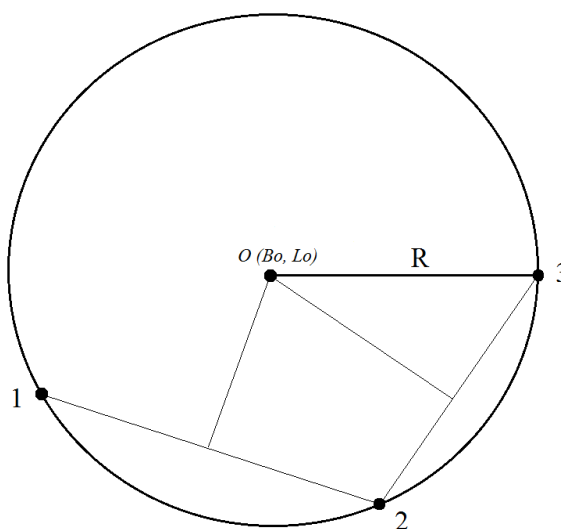


Рисунок 3.3 - Модель объекта местности в виде окружности

Нелинейные объекты параболической формы можно описать квадратичными сплайнами Безье [16].

$$\begin{aligned} B(t) &= (1-t)^2 \cdot B_1 + 2 \cdot t \cdot (1-t) \cdot B_2 + t^2 \cdot B_3 ; \\ L(t) &= (1-t)^2 \cdot L_1 + 2 \cdot t \cdot (1-t) \cdot L_2 + t^2 \cdot L_3 ; \\ H(t) &= (1-t)^2 \cdot H_1 + 2 \cdot t \cdot (1-t) \cdot H_2 + t^2 \cdot H_3. \end{aligned} \quad (3.3)$$

где точки $B_1 (B_1, L_1, H_1)$ и $B_3 (B_3, L_3, H_3)$ принадлежат кривой, а точка B_2 с координатами (B_2, L_2, H_2) является управляющей (Рисунок 3.4). Координаты управляющей точки можно определить по формулам (3.3) если известны координаты еще одной точки, принадлежащей кривой и соответствующий ей параметр t ($0 < t < 1$).

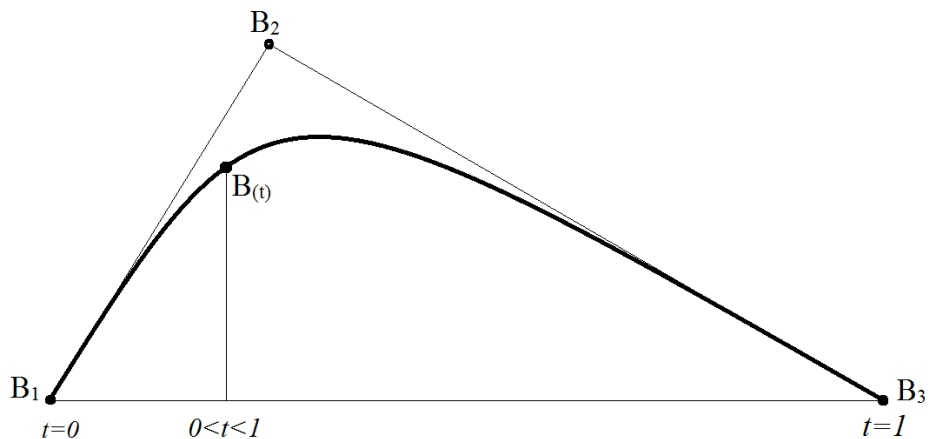


Рисунок 3.4 - Модель объекта местности параболической формы

Квадратичные сплайны Безье можно также построить по трем точкам, координаты и высоты которых измерены на объекте местности параболической формы.

Алгоритм поиска решения, т. е. определения параметров преобразований a_i, b_i , остается таким же, как и в случае с отрезками прямых [1-4]. Из итерационного решения системы нормальных уравнений определяются параметры преобразований a_i, b_i , и значений параметров t для всех участков (отрезков) кривых, которые определяют положение на них соответствующих точек.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили правомерность применения к нелинейным объектам, подхода, разработанного для отрезков прямых [4].

По опорным точкам местности, линейным и нелинейным объектам было выполнено уточнение геодезической привязки снимка КА ДЗЗ Ресурс-П (разрешение 0,8 м) на территорию Дмитровского района Московской области. Опорными данными служили:

- двенадцать опорных точек, координаты которых были определены с использованием спутниковой геодезической аппаратуры в статическом дифференциальном режиме;
- плановые координаты точек линейных и нелинейных объектов, измеренные на ранее созданном ортофотоплане с разрешением 0,5 м, точность (СКО) которого, подтвержденная по контрольным геодезическим точкам, оценивается на уровне 0,8 метра;
- высоты точек линейных и нелинейных объектов, полученные с использованием картографических материалов.

Расположение опорных данных показано на рисунке 3.5

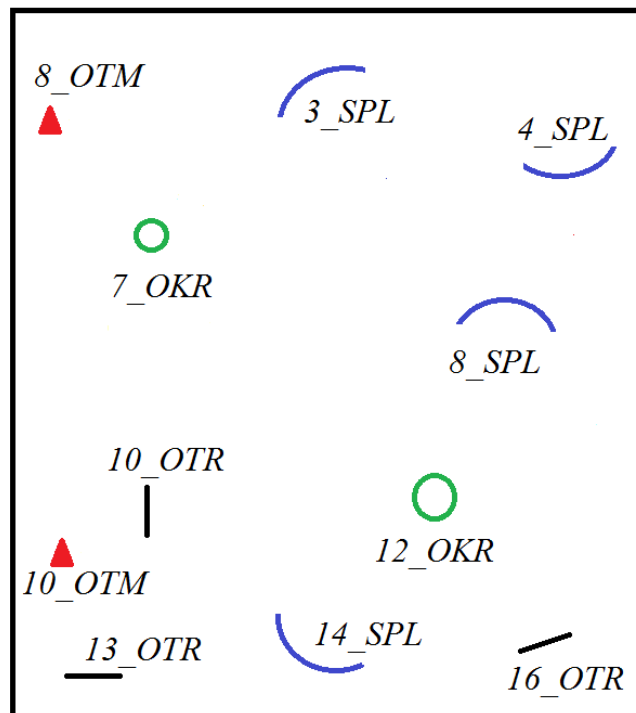


Рисунок 3.5 - Схема расположение на снимке опорных данных

На рисунке 3.5 показаны опорные данные, участвовавшие в решении: опорные точки местности (красные треугольники); объекты круглой формы (объекты зеленого цвета), нелинейных объектов параболической формы (синие дуги); отрезки линейных объектов (черные отрезки).

По полученным опорным данным с использованием модернизированного ПК «ГКСС» были определены параметры аффинных преобразований, уточняющих геодезическую привязку снимка КА ДЗЗ Ресурс-П. В таблице 3.2 приведены значения невязок координат соответственных точек, полученных в результате уравнивания.

Таблица 3.2 - Значения невязок координат опорных точек, полученных в результате уравнивания (снимок «Ресурс-П»)

Идентификатор точки	D_x (pix)	D_y (pix)	D_{xy} (pix)
4_SPL	-0,2	-0,3	0,4
13_OTR	0,6	-0,1	0,6
10_OTR	0,5	-0,2	0,6
14_SPL	-0,5	0,4	0,6
3_SPL	0,6	0,7	0,6
8_OTM	0,9	0,6	1,1
8_SPL	0,1	-1,1	1,2
10_OTM	-0,6	-0,9	1,2
12_OKR	-1,1	-0,3	1,2
16_OTR	1,4	0,9	1,7
7_OKR	-1,6	0,3	1,7
СКО	0,8	0,6	1,1

В таблице 3.2 использованы следующие обозначения опорных данных:

- OTM – опорная точка местности;
- OTR – линейный объект (отрезок);
- SPL – объект параболической формы;
- OKR – объект круглой формы.

В таблице 3.3 представлены результаты расхождения координат контрольных точек, полученные с использованием уточняющих параметров аффинных преобразований.

Таблица 3.3 - Расхождения координат на контрольных точках

Номер точки	D_x (pix)	D_y (pix)	D_{xy} (pix)
1	-1,1	0,8	1,3
2	0,2	-0,2	0,3
3	1,1	-1,6	1,9
4	0,9	0,2	1,0
5	0,4	-0,5	0,6
6	0,3	-0,6	0,7
7	0,2	-0,3	0,4
9	-1,9	-0,3	1,9
11	-1,2	-0,03	1,2
12	-0,6	-0,05	0,6
СКО	0,9	0,6	1,2

Результаты оценки точности полученного решения позволяют заключить, что объекты нелинейной формы могут использоваться в качестве опорных данных наряду с линейными объектами и опорными точками местности. Разработка технологии использования нелинейных объектов в качестве опорных данных при уточнении геодезической привязки космических снимков требует дополнительных исследований, которые выходят за рамки настоящей диссертационной работы.

Выводы по третьему разделу

Полученные результаты:

- разработана технология уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков с использованием в качестве опорных данных линейных объектов и отрезков автомобильных треков как отдельно, так и в сочетании с опорными точками местности;

- разработанная технология адаптирована к применению в качестве опорных данных отрезков автомобильных треков, полученных с использованием спутниковой геодезической аппаратуры и навигационных ГНСС приемников;

- определены перспективы развития разработанной технологии, основывающиеся на использовании в качестве опорных данных нелинейных объектов местности.

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

Основными преимуществами предложенного метода ориентирования космических сканерных снимков являются:

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

- повышение точности геодезической привязки космических снимков при использовании отрезков линейных объектов;

- расширение состава исходных данных при ориентировании малоинформативных космических снимков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа направлена на решение актуальной задачи - повышение точности геодезической привязки космических сканерных снимков. Целью работы являлось совершенствование методов привязки по наземным опорным данным космических сканерных снимков высокого разрешения, используемых для создания ортофотопланов. В ходе исследований выполнен анализ результатов научных работ, в которых для геодезической привязки космических снимков используются наземные опорные данные. Сформулирована задача уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков высокого разрешения по линейным объектам.

Разработана методика уточнения геодезической привязки космических сканерных снимков по линейным объектам, представленным отрезками пространственных прямых линий, определяемых по их координатам, измеренным на местности. Разработанная методика позволяет выполнять уточнение геодезической привязки космических снимков не только по линейным объектам, но и в сочетании их с опорными точками местности. Методика, изложенная в диссертационной работе, применима для геодезической привязки снимков с использованием модели RPC и других моделей.

Выполнена экспериментальная проверка методики с оценкой точности полученных решений на контрольных данных, показавшая ее работоспособность и возможность выполнения геодезической привязки космических сканерных снимков с точностями достаточными для создания ортофотопланов масштаба 1:10000.

Экспериментально подтверждено, что использование сочетания векторных опорных данных (отрезков линейных объектов, отрезков треков и ОТМ) 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.

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

На основе методики уточнения геодезической привязки космических снимков по линейным объектам разработана технология, в которой в качестве линейных объектов могут использоваться края дорожного покрытия, координатная привязка которых выполняется по трекам. Разработанная технология адаптирована к применению в качестве опорных данных отрезков автомобильных треков, полученных с использованием спутниковой геодезической аппаратуры и навигационных ГНСС-приемников.

Технология апробирована на реальных данных при уточнении геодезической привязки космических снимков отечественного космического аппарата ДЗЗ «Ресурс-П», а также ряда зарубежных КА ДЗЗ. Экспериментальная проверка технологии показала ее эффективность в условиях отсутствия контурных точек, которые могли бы использоваться в качестве опорных, и возможность значительного сокращения затрат времени на планово-высотную подготовку снимков. При использовании треков в качестве элементов планово-высотной основы достигается значительная экономия временных и финансовых затрат.

Выполнены исследования по расширению возможностей разработанной методики за счет использования для уточнения геодезической привязки космических снимков нелинейных объектов местности. Проведены экспериментальные исследования, которые подтвердили эффективность совместного использования в качестве опорных данных точечных, линейных и нелинейных объектов местности.

Основными достоинствами разработанной методики и технологии уточнения геодезической привязки космических снимков по отношению к применяемым на практике являются:

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

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

- расширение состава опорных данных при ориентировании малоинформативных снимков.

Разработанные методика и технология геодезической привязки космических сканерных снимков с использованием векторных данных повышают точность и надежность создания ортофотопланов.

Главная цель диссертационной работы достигнута.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система.

КА ДЗЗ – космический аппарат дистанционного зондирования Земли.

КТМ – контрольная точка местности.

ОТМ – опорная точка местности.

СКО – средняя квадратическая ошибка.

ЦФС – цифровая фотограмметрическая система.

DLT – Direct Linear Transformation. Прямое линейное преобразование.

GPS – Global Positioning System. Система глобального позиционирования.

GPX – GPS eXchange Format. Формат хранения и обмена данными GPS.

NMEA – National Marine Electronics Association. Стандарт, определяющий текстовый протокол связи морского оборудования между собой.

PPP – Precise Point Positioning. Позиционирование высокой точности.

RPC – Rational Polynomial Coefficients. Коэффициенты дробных рациональных функций.

WGS-84 – World Geodetic System 1984. Всемирная система геодезических параметров Земли 1984 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Аксенов А.Л., Козлов О.И. Нелинейные объекты в составе планово-высотной основы для геодезической привязки космических снимков / А.Л. Аксенов, О.И. Козлов Геодезия и Картография. №11, 2020. С. 20-28.
5. 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.
6. Андронов В.Г. Математические модели, методы и методики автономной фотограмметрической обработки космических сканерных снимков [Текст]: дис. на соиск. уч. степ. д-р. техн. наук: / Курск. 2016. – 328 с. : ил.
7. Андронов В.Г., Клочков И.А. Фотограмметрическая модель космических сканерных изображений / В.Г. Андронов, И.А. Клочков // Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». 2010. № 2. С. 56-63.
8. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии [Текст]: В 2 т. Т. 1. Монография / К.М. Антонович, ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с.: ил.
9. Аракчеев А.Н., Денисенко Л.Г., Михеева В.С., Погорелов В.В., Степаница А.И., Тарасов А.Н., Фролов Н.В. Применение линейных объектов для решения практических задач фотограмметрии / А.Н. Аракчеев, Л.Г. Денисенко, Михеева

В.С., В.В. Погорелов, А.И. Степаница, А.Н. Тарасов, Н.В. Фролов // Геодезия и картография. 2018. №10. С. 36-45.

10. Бабуров В.И., Иванцевич Н.В., Васильева Н.В., Панов Э.А. Исследование характеристик точности навигационных определений по ГЛОНАСС и GPS в условиях кренов потребителей / В.И. Бабуров, Н.В. Иванцевич, Н.В. Васильева, Э.А. Панов // Вопросы радиоэлектроники. Т.2, №2, 2008. с. 192-201.

11. Бакланов А.И. Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения / А.И. Бакланов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, № 2. 2010. с. 80-91.

12. Беленов А.В. Стандартные уровни обработки и форматы представления данных ДЗЗ из космоса. Мировой опыт / А.В. Беленов // Геоматика. – 2009. – №4(5). – С.18-20.

13. Беленов А.В., Лютвинская М.В. Практические аспекты обработки изображений со спутника ДЗЗ ALOS в ПК ENVI / А.В. Беленов, Лютвинская М.В. // Геопрофи. №1. 2007. С. 48-50.

14. Большаков В.Д., Маркузе Ю.И. Практикум по теории математической обработки геодезических измерений [Текст]: Учебное пособие для вузов / В.Д. Большаков, Ю.И. Маркузе. – М.Ж Недра, 1984. – 352с.

15. Бугаевский Л.М., Портнов А.М. Теория одиночных космических снимков [Текст]: / Л.М. Бугаевский, А.М. Портнов. – М.: Недра, 1984 – 280с.

16. Вергасов В.А., Журкин И.Г., Красикова М.В., Нейман Ю.М., Смирнов С.А. Вычислительная математика [Текст]: / В.А.Вергасов, И.Г. Журкин, М.В. Красикова, Ю.М. Нейман, С.А. Смирнов. – М.: Недра, 1976. – 230с.

17. Вержбицкий В.М. Численные методы. Математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения [Текст]: Учеб. пособие для вузов / 2-е изд., испр. / В.М. Вержбицкий. – М.: ОНИКС 21 век. 2005. – 400с.

18. Виноградов А.В. Оценка точности метода «Precise Point Positioning» и возможности его применения при кадастровых работах / А.В. Виноградов // Геопрофи. №2. 2010. с. 27-30.

19. Голубев В.В. Геодезия. Теория математической обработки геодезических измерений [Текст]: / В.В. Голубев. – МИИГАиК. 2016. – 424с.
20. Гомозов О.А., Корноухов К.В., Погорелов В.В., Чумаков С.В. Использование линейных объектов карт при внешнем ориентировании фотоснимков / О.А. Гомозов, К.В. Корноухов, В.В. Погорелов, С.В. Чумаков // Геодезия и картография. – 1993. – № 4. – С. 24-29.
21. Гражуль Д.И., Щербаков М.В., Панченко Д.П., Агафонов В.Ю. Обзор веб-сервисов по обмену GPS-треками / Д.И. Гражуль, М.В. Щербаков, Д.П. Панченко, В.Ю. Агафонов // Известия волгоградского государственного технического университета. №3 (182). 2016. с. 32-36.
22. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии [Текст]: / Е.З. Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 304 с.
23. Иванов А.В. Практикум по численным методам. Метод Ньютона [Текст]: Методическое указание / А.В. Иванов. – СПб. 2013. – 12с.
24. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Аналитическая геометрия [Текст]: Учебник для вузов. 3–е изд., стереотипное / В.А. Ильин, Э.Г. Позняк. – М.: Наука, 1981. – 232с.
25. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. ГКИНП (ГНТА)-02-036-02 [Текст]: Дата введения 2002–08-01. – 101с.
26. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов [Текст]: – М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 100 с.
27. Кадничанский С.А. Англо-русский словарь терминов по фототопографии и фотограмметрии. Русско-английский словарь терминов по фототопографии и фотограмметрии / С.А. Кадничанский. М.: ООО Издательство «Проспект», 2014. – 288с.
28. Калантаров Е.И., Никишин Д.А. Развитие процессов фотограмметрии проективными методами / Е.И. Калантаров, Д.А. Никишин // Известия вузов «Геодезия и Аэрофотосъемка». №1. 2003, с. 95-104.

29. Калиниченко Ю.В., Ищенко Я.С. Алгоритм привязки GPS-трека к дорожному графу / Ю.В. Калиниченко, Я.С. Ищенко // Сборник научных трудов «SWORLD». Т.13. №4. 2012.с. 78-80.
30. Кобзева Е.А. Оценка потенциала снимков с КА «Pleiades» для создания цифровых топографических карт и планов / Е.А. Кобзева // Геопрофи. №1. 2014. с. 54–57.
31. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике [Текст]: / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука. 1970.
32. Коршунов Р.А. Применение фиктивных точек для трансформирования контуров при актуализации цифровых топографических карт / Р.А. Коршунов // Геодезия и картография. 2017. Т. 78. № 6. с. 17-24.
33. Коршунов Р.А., Носков В.В., Погорелов В.В. Нецентральная обратная фотограмметрическая засечка / Р.А. Коршунов, В.В. Носков, В.В. Погорелов // Известия вузов «Геодезия и Аэрофотосъемка». №5. 2013. С. 67-71.
34. Космический аппарат «WorldView2». [Электронный ресурс], URL: <https://innoter.com/sputniki/»WorldView»-2/> (Дата обращения: 10.05.2019).
35. Космический аппарат «Ресурс-П». [Электронный ресурс], URL: https://www.ntsomz.ru/ks_dzz/satellites/resurs_p (Дата обращения: 01.05.2019).
36. Кузин А.А. Сравнение точности результатов GPS- и ГЛОНАСС-измерений в городских условиях / А.А. Кузин // Сборник материалов Международной научно-практической конференции. Издательство "Политехника" (С П-Б). 2015. с. 80-83.
37. Куприянов А.О. Глобальные навигационные спутниковые системы [Текст]: Учебное пособие / А.О. Куприянов. – М.: МИИГАиК, 2017. – 76 с.
38. Куприянов А.О., Климовский А.М. Экспериментальная оценка эффективности применения режима кинематики в реальном времени для решения навигационно-геодезических задач / А.О. Куприянов, А.М. Климовский // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка» 2012. № 1. с. 3-4.
39. Лесюта О.С., Миронов В.А. Применение кинематики реального времени / О.С. Лесюта, В.А. Миронов // Молодежный вестник ИРГТУ. №2. 2016. с. 19-20.

40. Лобанов А.Н., Фотограмметрия [Текст]: Учебник для вузов 2-е изд., перераб. и доп. / А.Н. Лобанов. – М.: Недра. 1984 – 552с.
41. Михайлов А.П., Чибуничев А.Г. Фотограмметрия. Учебное пособие. – М.: МИИГАиК. 2016. – 294с.
42. Назаров А.С. Фотограмметрия: Уч. пособие для студентов вузов. — Мн.: ТетраСистемс. 2006. – 368с.
43. Оньков И.В. Анализ точности ортоснимков WorldView-2 в зависимости от метода геометрической коррекции по опорным точкам / И.В. Оньков // Геоматика. №1. 2013. С. 24-31.
44. Основные положения по созданию и обновлению топографических карт масштабов 1:10 000 - 1:1 000 000. РИО ВТС [Текст]: – М.: – 1984 г. – 29с.
45. Основные положения по созданию топографических планов масштабов 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500 [Текст]: – М.: ГУГК. 1979. – 18с.
46. Погорелов В.В. Шавук В.С. Анализ математических моделей при фотограмметрической обработке космических снимков / В.В. Погорелов, В.С. Шавук // Геодезия и картография. №3. 2009. С. 30-32.
47. Погорелов В.В., Носков В.В., Хлебникова Г.М., Михеева В.С. Управляемые непрерывные модели в фотограмметрии / В.В. Погорелов, В.В. Носков, Г.М. Хлебникова, В.С. Михеева // Известия вузов «Геодезия и Аэрофотосъемка». №1. 2008. С. 96-109.
48. Привалов И.И. Аналитическая геометрия [Текст]: Учебник для вузов / И.И. Привалов. – М.: ГИЗ Физико-математической литературы. 1961. – 272с.
49. Сонюшкин А.В. Совершенствование технологии создания ортофотопланов по космическим изображениям высокого разрешения [Текст]: Автореферат дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / А.В. Сонюшкин. МИИГАиК. Москва. 2015. – 24с.
50. Титаров П.С. Метод приближённой фотограмметрической обработки сканерных снимков при неизвестных параметрах сенсора / П.С. Титаров // Геодезия и картография. – 2002. – № 6. – С. 30-34.

51. Титаров П.С. Оценка точности ориентирования продукта ДЗЗ Канопус-В уровня 2 с RPC [Электронный ресурс], / П.С. Титаров // URL: <https://racurs.ru/press-center/articles/bibliografiya-»Photomod»/bibliografiya-»Photomod»> (Дата обращения: 14.06.2018).
52. Титаров П.С. Практические аспекты фотограмметрической обработки сканерных космических снимков высокого разрешения [Текст]: Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации / П.С. Титаров // №3(45) – №4(46). 2004.
53. Универсальный метод фотограмметрической обработки сканерных снимков, [Электронный ресурс], URL: <https://racurs.ru/press-center/articles/bibliografiya-»Photomod»/bibliografiya-»Photomod»/> (Дата обращения: 06.04.2019).
54. Урмаев М.С. Космическая фотограмметрия [Текст]: Учебник для вузов / М.С. Урмаев. – Москва. Недра. 1989. – 279 с: ил.
55. ЦМР ASTER GDEM [Электронный ресурс], URL: https://ssl.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf (Дата обращения: 22.10.2018).
56. Чекалин В.Ф. Ортотрансформирование снимков [Текст]: / В.Ф. Чекалин. М.: – Недра. 1986. 166 с.
57. Чекалин В.Ф., Корнеев С.Л. Анализ принципов построения геометрии космических снимков и математических моделей их обработки / В.Ф. Чекалин, С.Л. Корнеев // Геодезия и картография. - № 10. Т. 78. – 2017.
58. Широкова Т.А., Чермошенцев А.Ю. Исследование точности обработки космических снимков сверхвысокого разрешения с использованием рациональных функций / Т.А. Широкова, А.Ю. Чермошенцев // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 99-103.
59. Шумейко С.А. Опыт создания карт открытого пользования масштаба 1:25 000 на территорию Благовещенского района / С.А. Шумейко // Геоматика. № 3. 2010. С. 80-85.
60. Fraser C.S., Hanley H.B. Bias compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery / C.S. Fraser, H.B. Hanley // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, ASPRS Annual Conference. August 2005. Pp. 909-915.

61. Fraser C.S., Hanley H.B. Sensor orientation for high-resolution satellite imagery: further insights into bias-compensated RPC's / C.S. Fraser, H.B. Hanley // Commission I, WG I/2, Nov. 2002. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.isprs.org/proceedings/xxxv/congress/comm1/papers/5.pdf> (Дата обращения: 10.02.2020).
62. Grodecki J., Dial G. Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials / J. Grodecki, G. Dial // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 69, No.1, January 2003, pp. 59-68.
63. Grodecki J., Dial G. Ikonos Geometric Accuracy / J. Grodecki, G. Dial // Pesora 15/Land Satellite Information // IV/ISPRS Commission I/FIEOS. 2002. Conference Proceedings. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://engineering.purdue.edu/~bethel/ik_geom_acc.pdf (Дата обращения: 11.02.2020).
64. Habib A., Morgan M., Kim E.M., Cheng R. Linear features in photogrammetric activities / A. Habib, M. Morgan, E.M. Kim, R. Cheng // PS ICWG II/IV. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm2/papers/200.pdf> (Дата обращения: 11.02.2020).
65. Habib A., H.T. Lin, and M. Morgan, 2003. Autonomous space resection using point- and line-based representation of free-form control linear features / A. Habib, H.T. Lin, M. Morgan // The Photogrammetric Record, 18 (103): 244-258.
66. Heikkila J. (1991) Use of Linear Features in Digital Photogrammetry / J. Heikkila // Photogrammetric journal of Finland. 12. 2. pp. 42-44.
67. Iwanicki M., Ke L.C., Wolniewicz W. First Results of the Parametrical Model for Satellite Sensors / M. Iwanicki, L.C. Ke, W. Wolniewicz // WG I/5, IV/3, May 2007. Page 5.
68. Kubik K. Relative and absolute orientation based on linear features / K. Kubik // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 46(4): 199-204. 1991.
69. Kuester M. Radiometric Use of WorldView-3 Imagery / M. Kuester // Digital Globe. Technical Note, 2016-02-22.

70. Lee H.-Y., Park W. (2002) A new Epipolarity model based on the simplified push-broom sensor model / H.-Y. Lee, W. Park // ISPRS Commission IV, WG4/7, July 9–2, pp. 407-413.
71. Lugnani J.B. Control features – An alternative source for urban area control // Paper presented at the XV Congress of the ISR&RS, Commission III, Rio de Janeiro, 1984. P. 694-656.
72. Lugnani J.B. Using digital entities as control / J.B. Lugnani // PhD. Thesis, Department of Surveying Engineering. UNB. 1980.
73. Luong C. K., Tran N. T., Nguyen V. H. Correction of spectral radiance of optical satellite image for mountainous terrain for studying land surface cover changes / C.K. Luong C. K., N.T. Tran V.H. Nguyen // Geodesy and Cartography. Vol. 63, No 1, 2014, pp. 39-53.
74. Masry S.E. Digital Mapping Using Entities: A New Concept / S.E. Masry // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. №11, Vol.48, pp. 1561-1565. 1981.
75. Morgan M., Kim K., Jeong S., Habib A. Parallel projection modeling for linear array scanner scenes / M. Morgan, K. Kim, S. Jeong, A. Habib // PS WG III/1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<https://www.isprs.org/proceedings/xxxv/congress/comm3/papers/240.pdf>
 (Дата обращения: 18.12.2018).
76. Mulawa D.C., Mikhail E. M. Photogrammetric Treatment of Linear Features / D.C. Mulawa, E. M. Mikhail // Technical Commission III: Mathematical Of Data Supplements from Part B10. July 1988. Kyoto. Japan. pp. 383-394.
77. Nigel B. Linear Feature Based Matching of Stereo SPOT Satellite Images / B. Nigel // Commission IV. August 1992. Page(s) 908-915.
78. Ok A.O., Turker M. Comparison of different mathematical models on the accuracy of the orthorectification of Aster imagery / A.O. Ok, M. Turker // Commission I, WG I/G. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
https://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/1-W41/makaleler/OK_Model_ASTER.pdf
 (Дата обращения: 18.12.2018).

79. Poli D., 2005. Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors. Ph. D. Dissertation / D.Poli // IGP Report No. 85, ISSN 0252-9335 ISBN 3-906467-3, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.
80. Smith M., Park D. 2000. Absolute and exterior orientation using linear features / M. Smith, D. Park // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, The Netherlands, 33(B3): pp. 850-857.
81. Susumu H. Orientation of high-resolution satellite images based on affine projection / H. Susumu // Working Group IC/11. July 2000. Page(s) 359-366.
82. Tao V., Hu Y.A. comprehensive study on the rational functional model for photogrammetric processing / V.Tao, Y.A. Hu // PE&RS, 67 (12), 2001. pp. 1347-1357.
83. Tommaselli A.M.G., Lugnani J.B. (1988) An alternative mathematical model to the collinearity equation using straight features / A.M.G. Tommaselli, J.B. Lugnani // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Kyoto, Commission III, pp. 765–774.
84. Tommaselli, A.M.G., and C.L. Tozzi. (1996). A recursive approach to space resection using straight lines / A.M.G. Tommaselli, C.L. Tozzi. // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 62(1): pp. 57-66.
85. Topan H., Cam A., Özendi M., Oruç M., Jacobsen K., Taşkanat T. Pléiades project: assessment of georeferencing accuracy, image quality, pansharpening performance and DSM/DTM quality / H. Topan, A. Cam, M. Özendi, M. Oruç, K. Jacobsen, T. Taşkanat // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.–2016. – Vol.XLI-B1 – pp. 503-510.
86. Van den Heuvel F. A. (1997) Exterior orientation using coplanar parallel lines / F. A. Van den Heuvel // Proceedings of the 10th Scandinavian Conference on Image Analysis, pp. 71-78.
87. Venkateswar V., Chellappa R. (1992) Extraction of straight lines in aerial images / V. Venkateswar, R. Chellappa // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14 (11), pp. 1111-1114.

88. Wiesel J. Digital image processing for orthophoto generation / J. Wiesel // Photogrammetria. 01/1985; 40 (2): pp. 69-76.

Руководство к программному компоненту геодезической привязки космических сканерных снимков ПК «ГКСС» (АФЕК.13256-01)

ПК «ГКСС» предназначен для ориентирования космических сканерных снимков высокого разрешения по точечным и векторным опорным данным планово-высотной основы.

Ниже приведён перечень функций, которые реализованы в ПК «ГКСС»:

1. Формирование проекта, содержащего геодезические координаты опорных точек местности, граничных и средних точек отрезков линейных объектов, а также исходный RPC, ориентируемого снимка;
2. Загрузка геодезических координат В, L, Н и в проекции UTM X, Y, Н граничных точек отрезков линейных объектов;
3. Формирование опорных данных, включающих: геодезические и пиксельные координаты OTM и точек отрезков линейных объектов;
4. Импорт/экспорт данных, содержащих геодезические и пиксельные координаты опорных и контрольных точек и отрезков линейных объектов в формате RAT-B;
5. Ориентирование снимка с использованием трех видов поправок (системный сдвиг, аффинные и полиномиальные поправки) с оценкой точности;
6. Определение значений взаимных углов между отрезками линейных объектов;
7. Корректировка опорных данных;
8. Графическое предоставление границ снимка и отображение опорных данных, и экспорт в формате MID/MIF.

Общая схема функционирования программы

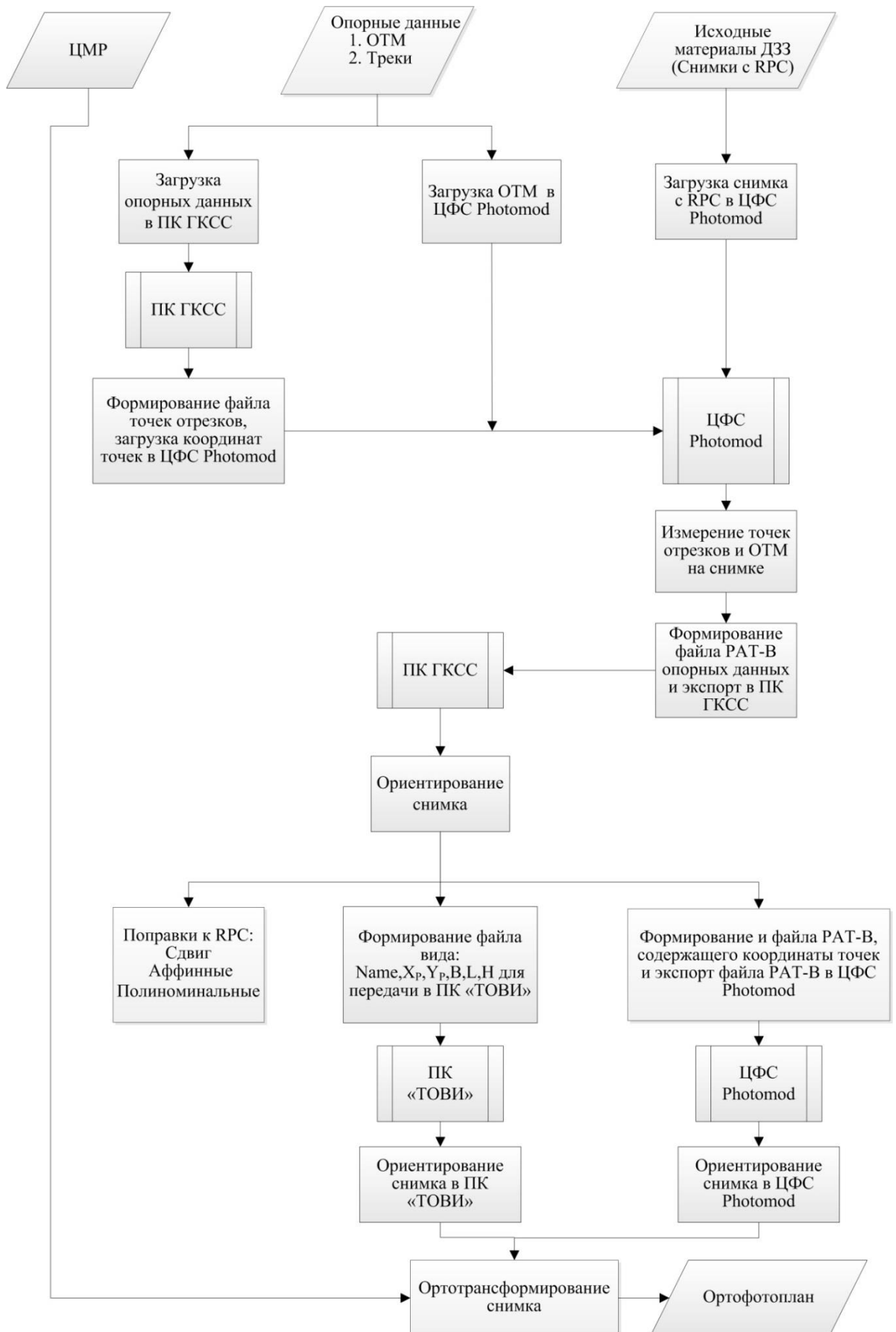


Рисунок А1 - Общая схема функционирования программы

Условия выполнения программы

Входные данные

Входными данными для ПК «ГКСС» являются координаты ОТМ и граничных точек линейных объектов. Помимо этого, в создаваемый проект загружается файл RPC ориентируемого снимка.

Выходные данные

Выходными данными является файл RPC с аффинными поправками и файл РАТ-В, содержащий измеренные координаты ОТМ и вычисленные координаты точек отрезков линейных объектов.

Требования к техническим и программным средствам

Программный комплекс должен функционировать на технических средствах, которые, обладают характеристиками не хуже следующих:

- процессор с частотой 2 ГГц;
- объем оперативной памяти – от 4 Гбайт;
- объем жесткого диска – не менее 50 Гбайт;
- сетевая карта – 1 Гбит/с.

Программный комплекс представляет собой 32-разрядное Windows-приложение и функционирует в 32/64-разрядных операционных средах Windows 7/8/10.

Выполнение программы

Запуск ПК «ГКСС»

Запуск программы выполняется щелчком мыши на иконке с названием ПК «ГКСС». При этом на экране появится главное окно программы, приведенное на рисунке А2.

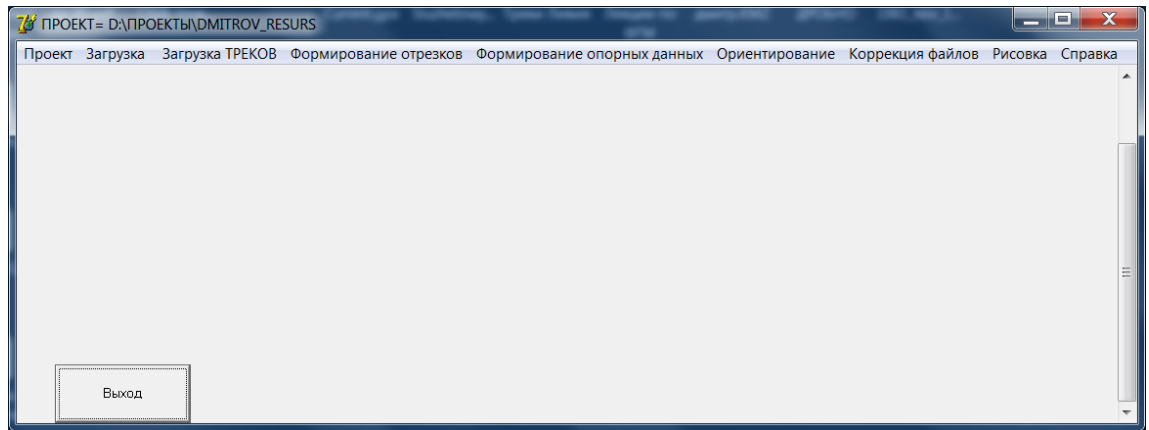


Рисунок А2 - Главное окно программы

Меню «Проект»

Меню «Проект» имеет следующие подменю:

Создать – создать проект ПК «ГКСС»;

Открыть – открыть проект ПК «ГКСС».

Меню «Создать проект»

При нажатии кнопки «Создать» на экране появится меню, приведенное на рисунке А3.

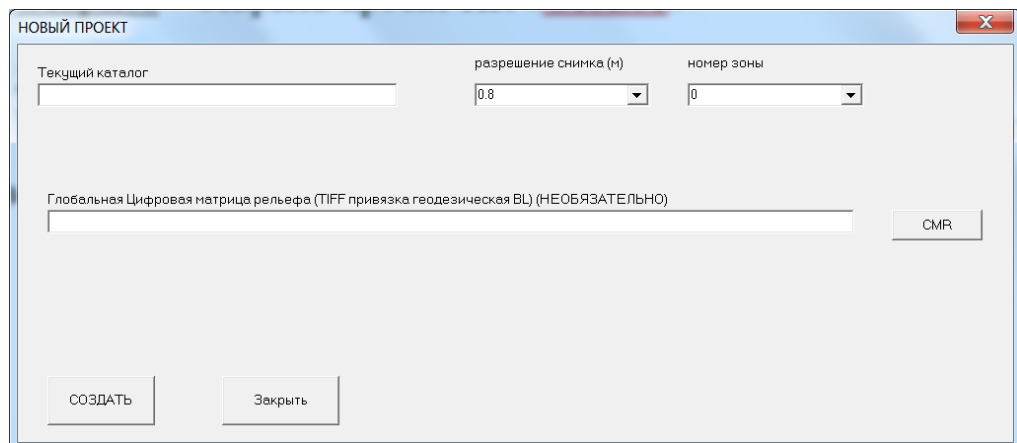


Рисунок А3 - Меню «Создать»

В данном меню задаются:

- папка хранения проекта;
- разрешение снимка;
- номер зоны UTM;
- путь к цифровой модели рельефа (если имеется).

Меню «Открыть проект»

При нажатии кнопки «Открыть» на экране появится меню, приведенное на рисунке А4.

D:\ПРОЕКТЫ\DMITROV_RESURS

СНИМОК

Идентификатор снимка
0041_04213_02_G_DM

Высота снимка
57422

Ширина снимка
60114

Размер пиксела (m)
0.8

Дата создания проекта
04.07.2019

Геодезическая привязка снимка

BSW
55,93208175

LSW
37,0306593333333

Номер зоны
37

BNE
56,3229691666667

LNE
37,7297229444444

BSE
55,9414030555556

LSE
37,7422402777778

BNW
56,3135136666667

LNW
37,0110685277778

CMR

Путь к файлу

ОТКРЫТЬ

ВЫХОД

Рисунок А4 - Меню «Открыть»

В данном меню отображаются:

- идентификатор снимка;
- высота снимка (в пикселях);
- ширина снимка (в пикселях);
- размер пикселя снимка (в метрах);
- дата создания проекта;

- геодезические координаты углов снимка;
- номер зоны UTM;
- путь к файлу цифровой модели рельефа.

Меню «Загрузка»

Меню «Загрузка» имеет следующие подменю:

- Файл номеров отрезков;
- RPC формат «Photomod»;
- Файлы измерений РАТ-В («Photomod»);
- Файл треков.

Меню «Файл номеров отрезков»

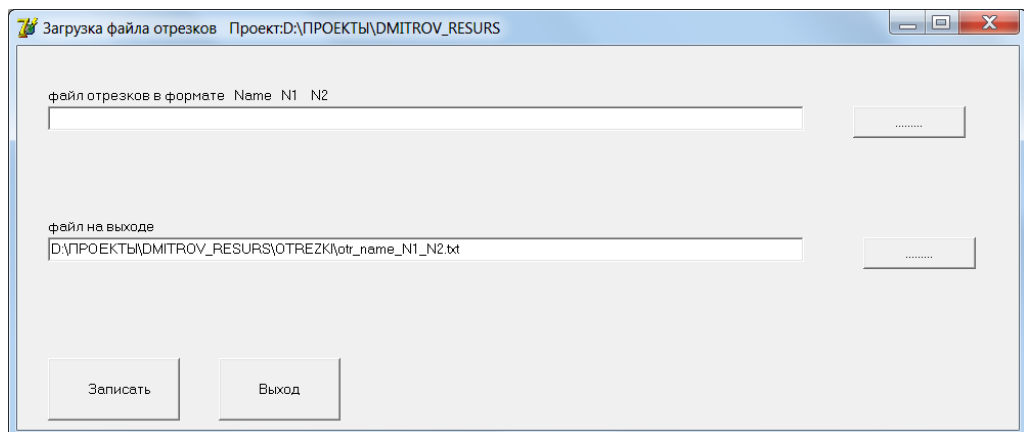


Рисунок А5 - Меню «Файл номеров отрезков»

В верхнем поле загружается файл отрезков, содержащий имя (номер) отрезка порядковые номера его граничных точек. (Файл предварительно создается в текстовом редакторе).

В нижнем выбирается путь для сохранения файла с именем, стандартизованным для использования в проекте ПК «ГКСС» «otr_name_N1_N2.txt» (Рисунок А5).

Меню «RPC формат «Photomod»»

Выполняется конвертация файла RPC снимка из формата «Photomod» в формат GeoEye.

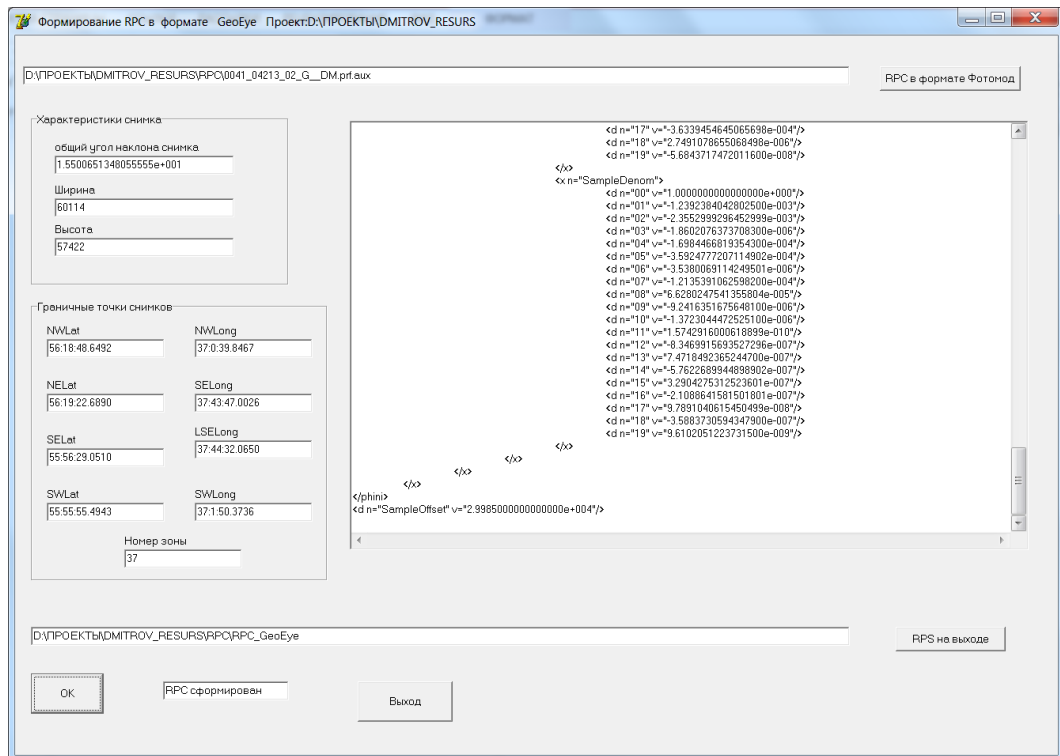


Рисунок А6 - Меню «RPC формат «Photomod»»

В верхнем поле загружается файл RPC в формате «Photomod». Далее идут характеристики снимка. Широта, высота, наклон, граничные точки снимка и номер зоны UTM.

В нижнем поле указывается путь к папке, в которой будет сформирован файл RPC в формате GeoEye (Рисунок А6).

Меню «Файлы измерений РАТ-В («Photomod»»)

Выполняется переименование файла измерений РАТ-В для сохранения файла с именем, стандартизованным для использования в проекте ПК «ГКСС».

В верхних полях загружаются элементы файла РАТ-В, содержащие измерения точек на снимке и на местности.

В нижнем поле указывается путь к папке, в которой будет сформирован файл РАТ-В со стандартизованным именем «ХУН.XYZ» (Рисунок А7).

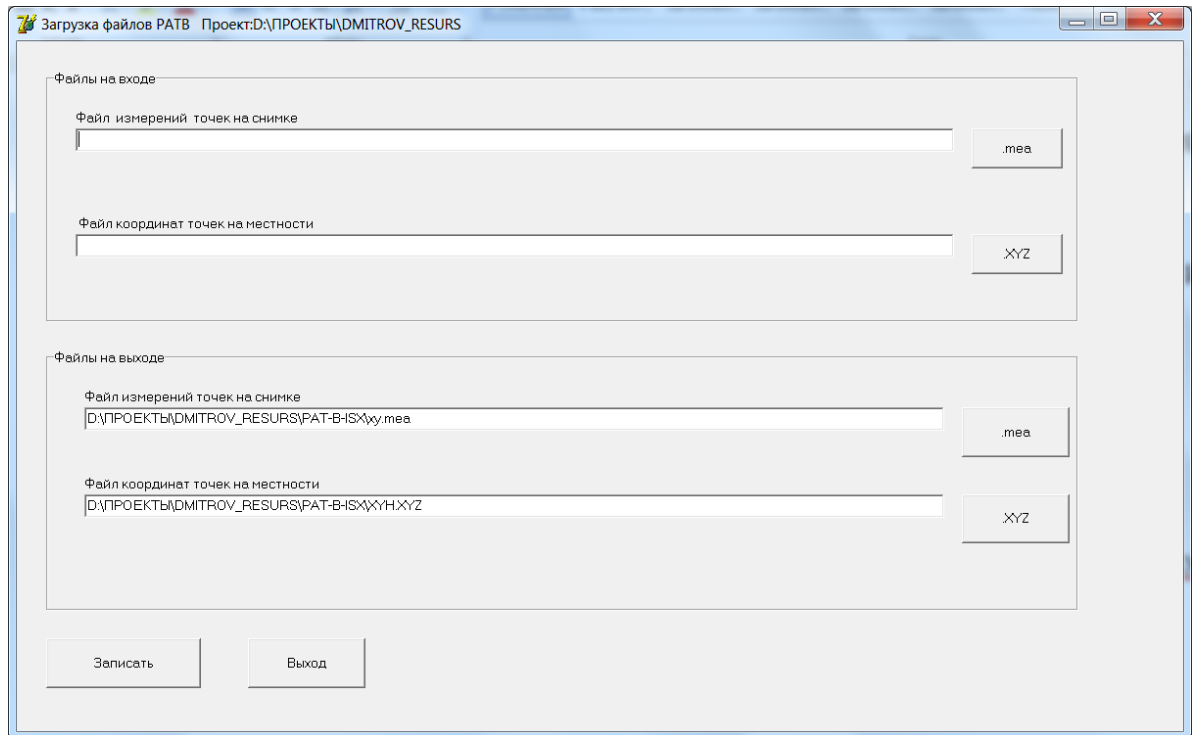


Рисунок А7 - Меню «Файлы измерений PAT-B («Photomod»)»

Меню «Файл треков»

Выполняется переименование файла треков для сохранения файла с именем, стандартизованным для использования в проекте ПК «ГКСС» «XYH.txt» (Рисунок А8).

В верхних полях загружается файл трека, содержащий координаты точек трека на местности.

В нижнем поле указывается путь к папке, в которой будет сформирован файл трека со стандартизованным именем.

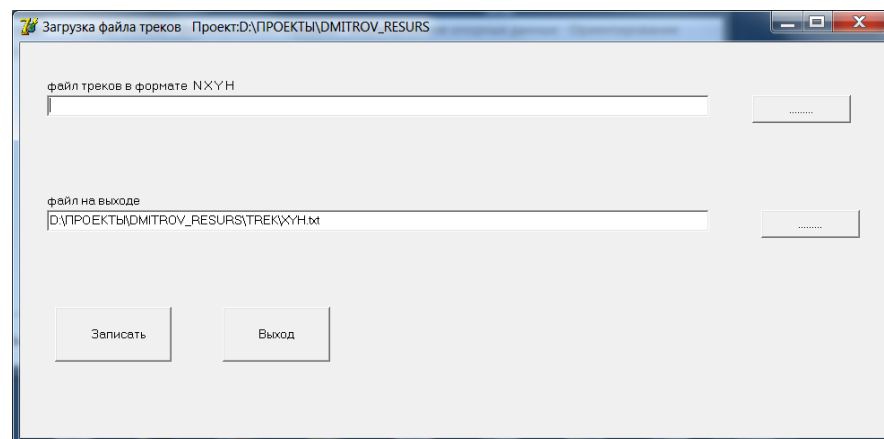


Рисунок А8 - Меню «Файл треков»

Меню «Загрузка треков»

Меню «Загрузка треков» имеет следующие подменю:

- Формат «*.txt» (*B, L, H*) строгие;
- Формат «*.grx» Интернет.

Если файлы исходных треков в формате XML с расширением *.grx вызывается программа из подменю «Формат «*.grx» Интернет», если треки в текстовом формате расширение "*.txt" (в геодезической геоцентрической или картографической (UTM) системе координат) вызывается программа из подменю «Формат «*.txt» (*B, L, H*) строгие».

Меню «Формат «*.txt» (*B, L, H*) строгие»

Выполняется формирование единого файла трека из текстового файла(ов), предварительно помещенного в каталог TREK в папке проекта (Рис. А9).

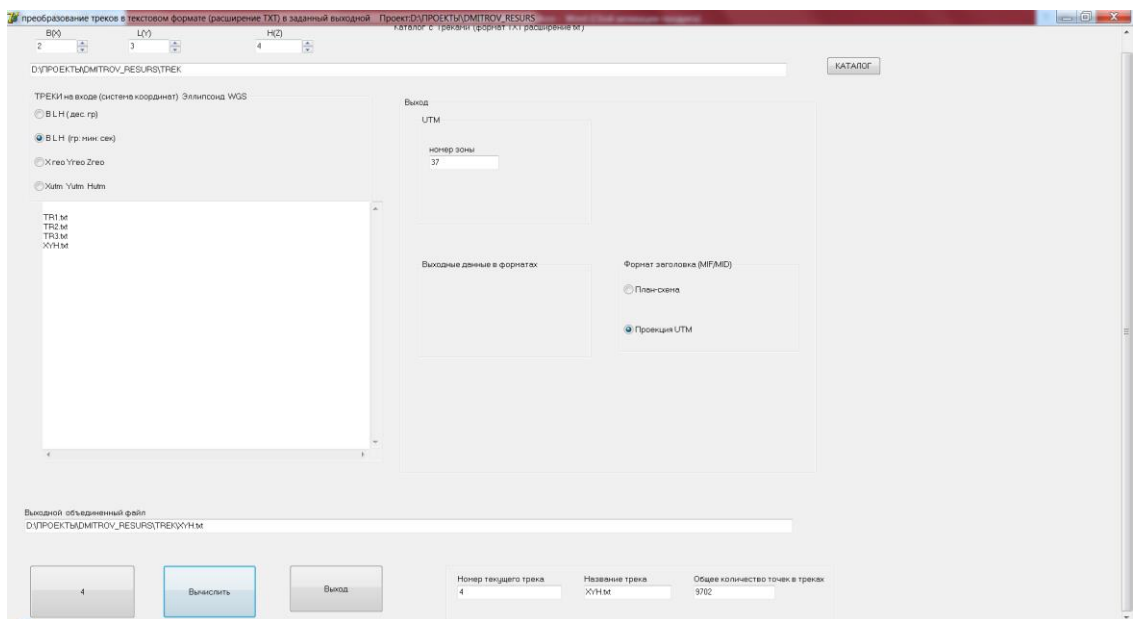


Рисунок А9 - Меню «Формат «*.txt» (*B, L, H*) строгие».

В верхнем поле задается порядок считывания координат из текстового файла. Далее указывается путь к каталогу TREK, в котором находятся файлы треков. Затем задается система координат (геодезическая или картографическая), в которой записаны точки трека и номер зоны UTM.

При нажатии кнопки «Количество треков» отображаются файлы, находящиеся в каталоге TREK.

После нажатия кнопки «Вычислить» отобразятся:

- номер текущего трека;
- название трека;
- общее количество точек трека.

Меню «Формат «*.grx» Интернет»

Данное меню предназначено для загрузки треков в формате *.grx.

Порядок действий оператора аналогичен пунктам «Формат «*.txt» (B, L, H) строгие».

Меню «Формирование отрезков»

Меню «Формирование отрезков» предназначено для формирования файлов координат средних и граничных точек отрезков по списку номеров и координат точек трека в проекции UTM (Рисунок А10).

Формирование исходных данных - списка номеров и координат точек трека в проекции UTM, описано в пунктах «Файл номеров отрезков» и Меню «Формат «*.txt» (B, L, H) строгие» данного руководства.

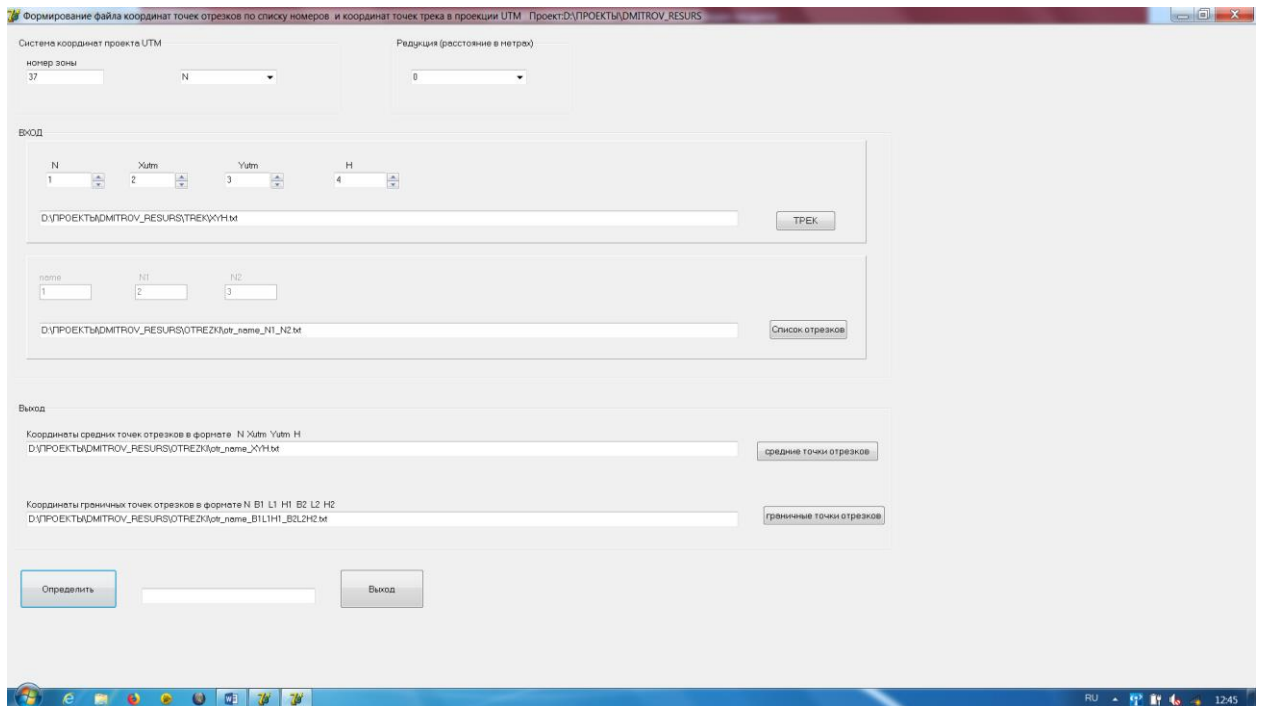


Рисунок А10 - Меню «Формирование отрезков»

В верхних полях (Вход) задаются номер зоны UTM, исходные файлы списка номеров и координат точек трека, порядок считывания данных из файла трека и величина редукции точек трека (расстояние от обочины дороги).

В нижних полях (Выход) выводятся путь к файлам средних и граничных точек трека и их имена.

Далее следует загрузить файл координат средних точек отрезков, сформированный в Меню «Формирование отрезков» в проект ПК «Photomod».

Выполнить автоматическое наведение с использованием координат средних точек отрезков. Выполнить измерение произвольной точки на отрезке, который соединяет граничные точки.

Так же выполняются измерения опорных точек, если они есть.

Меню «Формирование опорных данных»

Меню предназначено для формирования файла координат отрезков в каталоге OTREZKI и файла опорных точек в каталоге OPORA, необходимых для ориентирования снимка и контроля. Статус отрезков и точек потом можно изменить в пункте меню "Коррекция файлов". Точки могут быть опорными (M), контрольными (K) и не используемыми (D). Отрезки могут быть только опорными (M) или не используемыми (D).

Содержит два подменю:

- Отрезки;
- Точки.

Меню «Отрезки»

Формирование геодезических координат граничных точек отрезков Проект:D:\ПРОЕКТЫ\DMITROV_RESURS

PAT_B

N Xпр Yпр

1 2 3

D:\ПРОЕКТЫ\DMITROV_RESURS\PAT-B-IS\xy.mea Изнеренные координаты точек отрезков (.mea)

N B1 L1 H1 B2 L2 H2

1 2 3 4 5 6 7

D:\ПРОЕКТЫ\DMITROV_RESURS\OTREZKI\otr_name_B1L1H1_B2L2H2.m Граничные точки отрезков

Цвет MFM/D

Черный

Выходные файлы

Координаты точек отрезков в формате Name PR Xпр Yпр B1 L1 H1 B2 L2 H2

D:\ПРОЕКТЫ\DMITROV_RESURS\OTREZKI\otr_name_pr_xy_B1L1H1_B2L2H2.m Точки отрезков

Вычислить Выход

Рисунок А11 - Меню «Отрезки»

Меню предназначено для формирования файла координат отрезков в каталоге OTREZKI. Исходными данными являются файл пиксельных координат с расширением *.mea и файл граничных точек отрезков вида «otr_name_B1L1H1_B2L2H2.txt» (Рисунок А11).

Выходным файлом является файл вида «otr_name_pr_xy_B1L1H1_B2L2H2.txt», содержащий геодезические и пиксельные координаты граничных точек отрезков. Так же есть меню выбора цвета рисовки отрезков.

Меню «Точки»

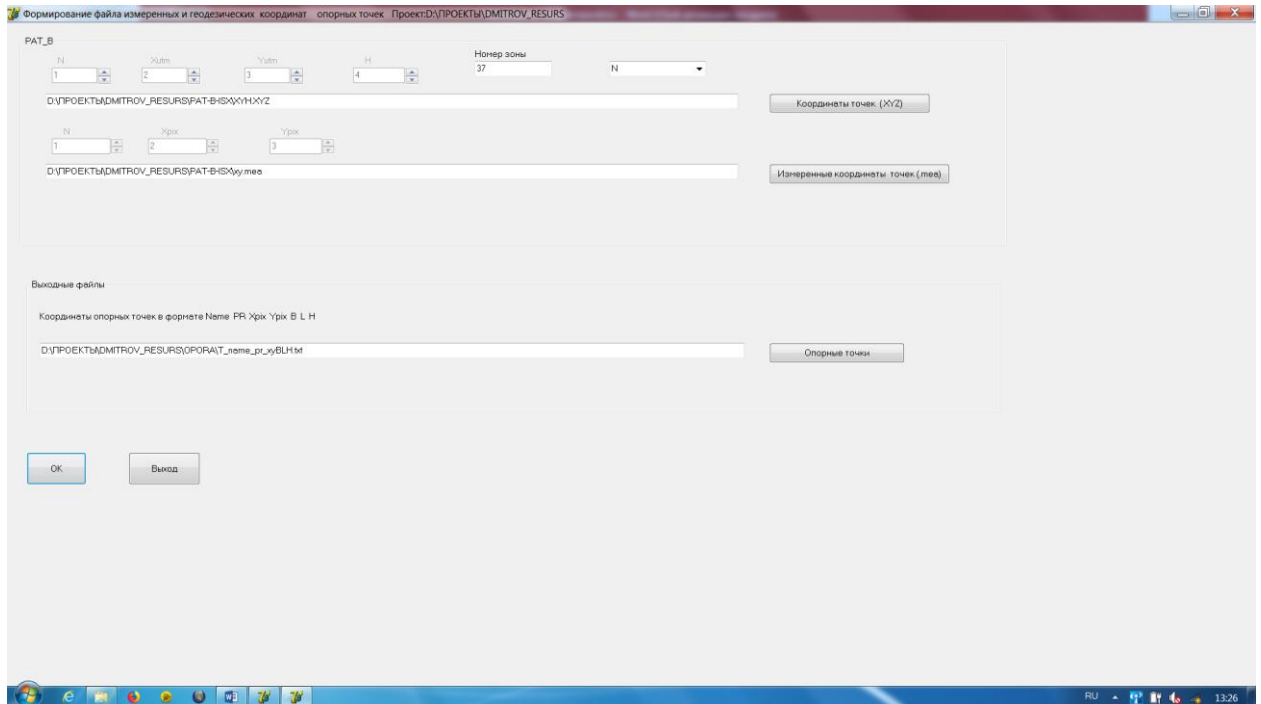


Рисунок А12 - Меню «Точки»

Меню предназначено для формирования файла координат ОТМ в каталоге OPORA. Исходными данными являются файл пиксельных координат с расширением *.mea и файла геодезических координат с расширением *.xyz (Рисунок А12).

Выходным файлом является файл вида «T_name_pr_xyVLN.txt», содержащий геодезические и пиксельные координаты ОТМ.

Меню «Ориентирование»

В меню выполняется ориентирование снимка с учетом трех видов поправок к RPC полиномам (Рисунок А13а).

Включает 3 подменю:

- аффинные поправки;
- сдвиг;
- полиномиальные поправки.

Вид и состав подменю идентичен. Рассмотрим его на примере подменю «аффинные поправки»

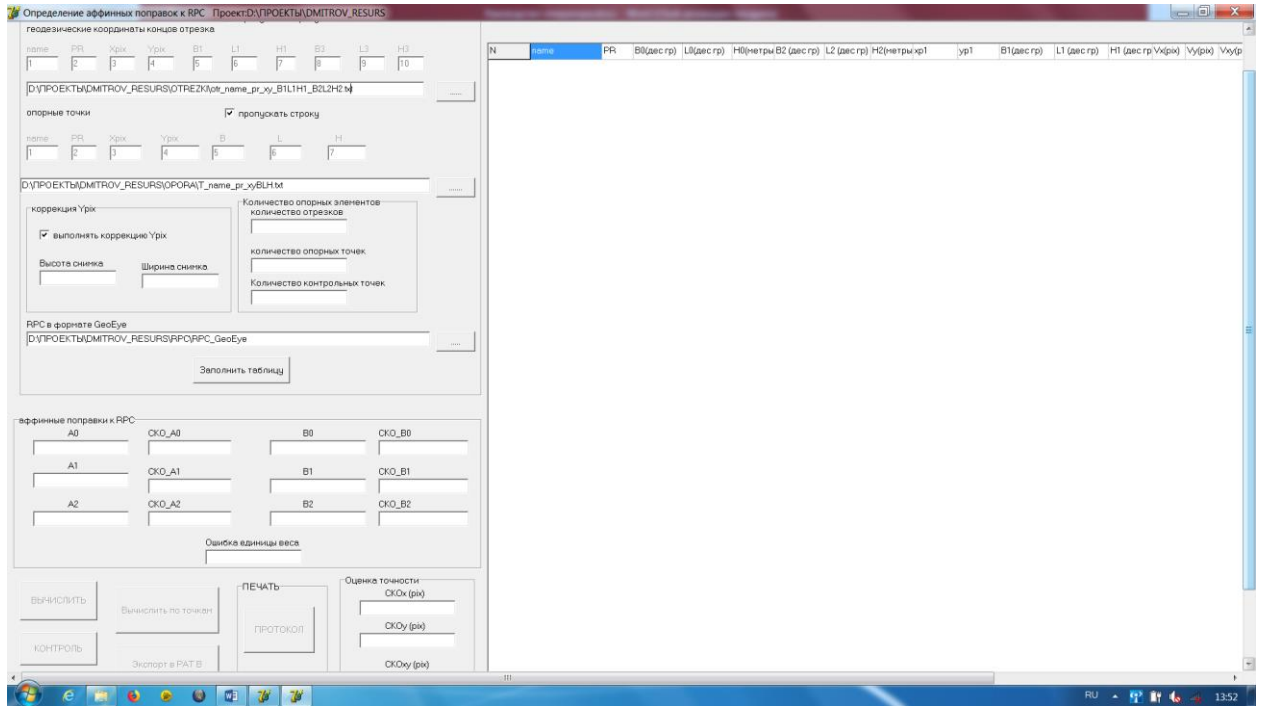


Рисунок А13а - Меню «Ориентирование»

Исходными данными является файл координат граничных точек отрезков и файл координат ОТМ, сформированные в меню «Формирование опорных данных». Также файл RPC в формате GeoEye, сформированный в меню «RPC формат «Photomod».

При нажатии кнопки «Заполнить таблицу» происходит автозаполнение полей «количество отрезков», «количество опорных точек», «количество контрольных точек». В правой части окна меню отобразятся пиксельные и геодезические координаты опорных данных (отрезков и ОТМ) (Рисунок А13б).

Определение аффинных поправок к RPC. Проект: D:\ПРОЕКТЫ\DMITROV_RESURS

Имя файла: 0041_04213_02_G_CM

Рексит: _____

Входные данные

пропускать строку

геодезические координаты концов отрезка

name	PR	Xrpc	Yrpc	B1	L1	H1	B3	L3	H3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

D:\ПРОЕКТЫ\DMITROV_RESURS\OTREZKI\ot_name_rpc_xy_B1L1H1_B2L2H2.m

опорные точки

пропускать строку

name	PR	Xrpc	Yrpc	B	L	H
1	2	3	4	5	6	7

D:\ПРОЕКТЫ\DMITROV_RESURS\OFORAIT\ot_name_rpc_xy_B1H1.m

коррекция Yrpc

выполнять коррекцию Yrpc

Высота снимка: 57422 Ширина снимка: 60114

Количество опорных элементов: 20
Количество опорных точек: 0
Количество контрольных точек: 12

RPC в формате GeoEye
D:\ПРОЕКТЫ\DMITROV_RESURS\RPC\RPC_GeoEye

аффинные поправки к RPC

A0	SKO_A0	B0	SKO_B0
A1	SKO_A1	B1	SKO_B1
A2	SKO_A2	B2	SKO_B2

Ошибка единицы веса

 Оценка точности: SKOx (px) SKOy (pix)

N	name	PR	B0(дес.рп)	L0(дес.рп)	H0(метры)	B2(дес.рп)	L2(дес.рп)	H2(метры)	xp1	yp1	B1(дес.рп)	L1(дес.рп)	H1(дес.рп)	Vx(px)	Vy(px)	Vo(p)
1	OTR_1	M	56.20919271	37.28893162	222.119	56.20732108	37.28944861	220.893	22855.914	116536.406						
2	OTR_10	M	56.18246960	37.51638195	181.636	56.18172595	37.51697171	182.707	41790.252	20828.129						
3	OTR_11	M	56.22245380	37.51699595	164.862	56.22314833	37.51516001	164.122	41853.835	14201.557						
4	OTR_12	M	56.06474874	37.27501483	247.252	56.06454662	37.27530801	245.913	23147.438	38843.820						
5	OTR_13	M	56.09361136	37.36857845	213.294	56.09413159	37.36737771	218.033	28213.136	33811.870						
6	OTR_14	M	56.08380177	37.50706087	204.598	56.08333205	37.5077812	203.869	40739.865	35541.853						
7	OTR_15	M	56.98598436	37.31898170	207.282	56.98644652	37.32058611	207.812	24643.569	48918.562						
8	OTR_16	M	56.06416537	37.3727322	237.302	56.06472981	37.3784889	239.402	29789.389	38278.494						
9	OTR_17	M	56.03745845	37.44059944	219.307	56.03700810	37.4417756	220.182	35016.136	42492.994						
10	OTR_18	M	56.01626849	37.42474676	201.274	56.01630357	37.4240389	202.204	33524.514	45612.819						
11	OTR_19	M	56.01506854	37.50316237	216.976	56.01438151	37.50357312	216.240	40177.579	45993.887						
12	OTR_2	M	56.19179585	37.33834882	227.499	56.19200960	37.3316215	223.807	26305.134	19007.088						
13	OTR_20	M	56.00070191	37.52283141	194.565	56.00014592	37.5234801	193.532	41788.976	48178.729						
14	OTR_3	M	56.18902528	37.29670841	245.076	56.18937406	37.2977109	245.641	23465.761	19422.410						
15	OTR_4	M	56.17421876	37.27431500	234.312	56.17359557	37.2731038	238.019	21435.285	21597.975						
16	OTR_5	M	56.12621308	37.27857044	253.168	56.12545100	37.2787756	258.066	21676.747	28844.643						
17	OTR_6	M	56.13710896	37.31074866	227.823	56.13778653	37.3112947	227.207	24428.834	27160.509						
18	OTR_7	M	56.13324800	37.37053769	219.313	56.13288824	37.3690427	214.886	29345.936	27936.836						
19	OTR_8	M	56.14958177	37.41039487	242.549	56.14958761	37.4091401	243.012	32771.475	25531.163						
20	OTR_9	M	56.13816541	37.47898257	213.603	56.13813641	37.47839731	213.563	38546.884	27376.772						

Рисунок А13б - Меню «Ориентирование»

При нажатии кнопки «Вычислить» происходит вычисление аффинных поправок и ориентирование снимка. В поле «аффинные поправки к RPC» отображаются значения коэффициентов поправок a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 , b_2 с оценкой их среднеквадратических ошибок и ошибка единицы веса. Ниже отображаются поле «оценка точности» с параметрами SKO_x , SKO_y , SKO_{xy} . В правой части окна меню отобразятся рассчитанные геодезические координаты точек отрезков с оценкой смещения по координатным осям x и y (в пикселях) и значение параметра t , определяющего положение точки на отрезке с оценкой точности.

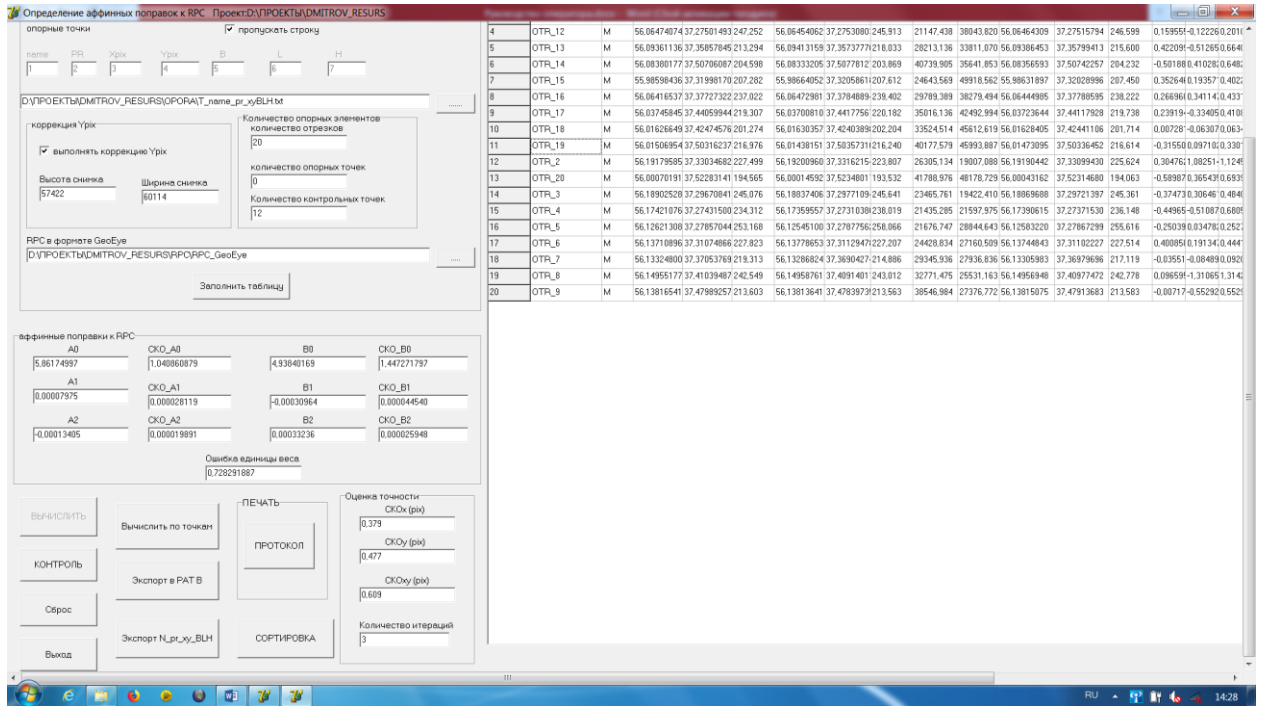


Рисунок А13в - Меню «Ориентирование»

Доступные поля (Рисунок А13в):

- протокол (формирование файла протокола ориентирования снимка);
- контроль (значения на контрольных точках с оценкой СКО);
- сортировка (сортировка по величине ошибок на точках отрезков, ОТМ или КТМ);
- сброс (сброс всех полей);
- экспорт в РАТ-В (экспорт данных в формат РАТ-В);
- экспорт в N_pr_xy_VLN.txt (экспорт данных в текстовый формат).

Меню «Коррекция файлов»

Меню предназначено для коррекции файлов точек отрезков (otr_name_pr_xy_B1L1H1_B2L2H2.txt) и ОТМ (T_name_pr_xy_VLN.txt) (Рисунок А14а)

Включает 2 подменю:

- коррекция отрезков;
- коррекция точек.

Вид и состав подменю идентичен. Рассмотрим его на примере подменю «коррекция отрезков».

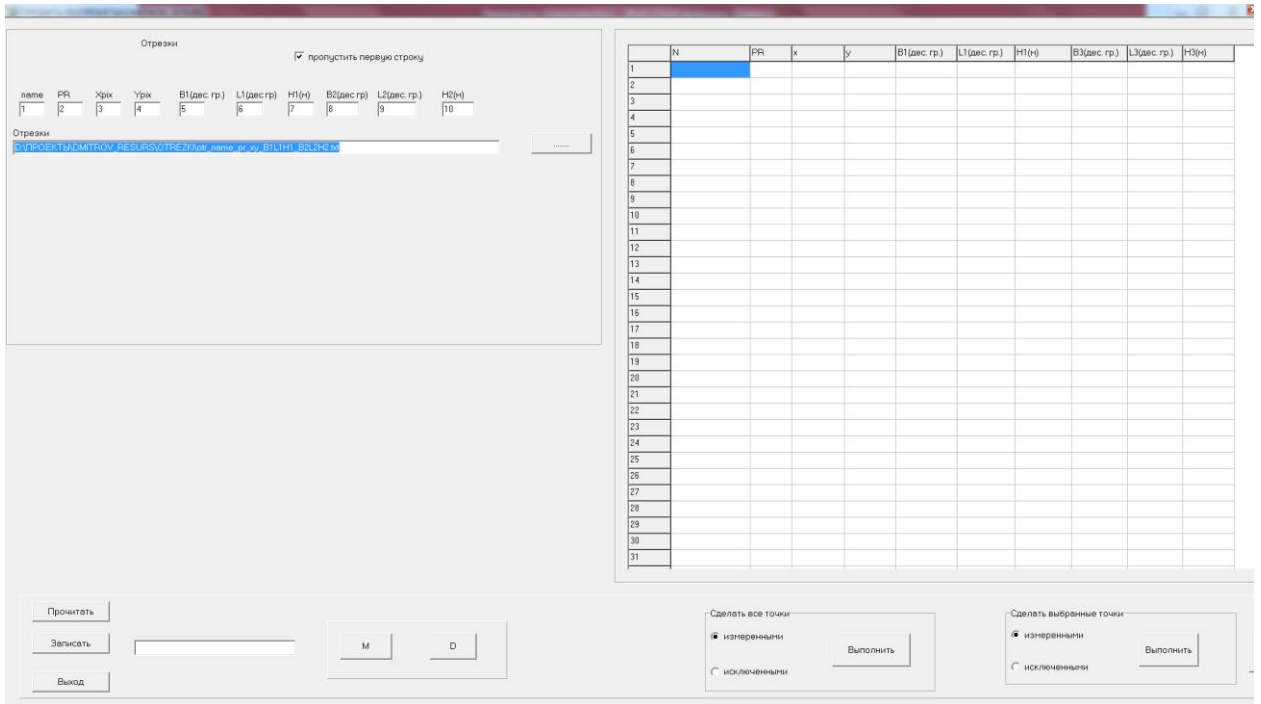


Рисунок А14а - Меню «Коррекция файлов»

Исходными данными является файл геодезических и пиксельных координат граничных точек отрезков «otr_name_pr_xy_V1L1H1_V2L2H2.txt», значения которых отображаются в правом поле меню, при нажатии кнопки «прочитать» (Рисунок А14б).

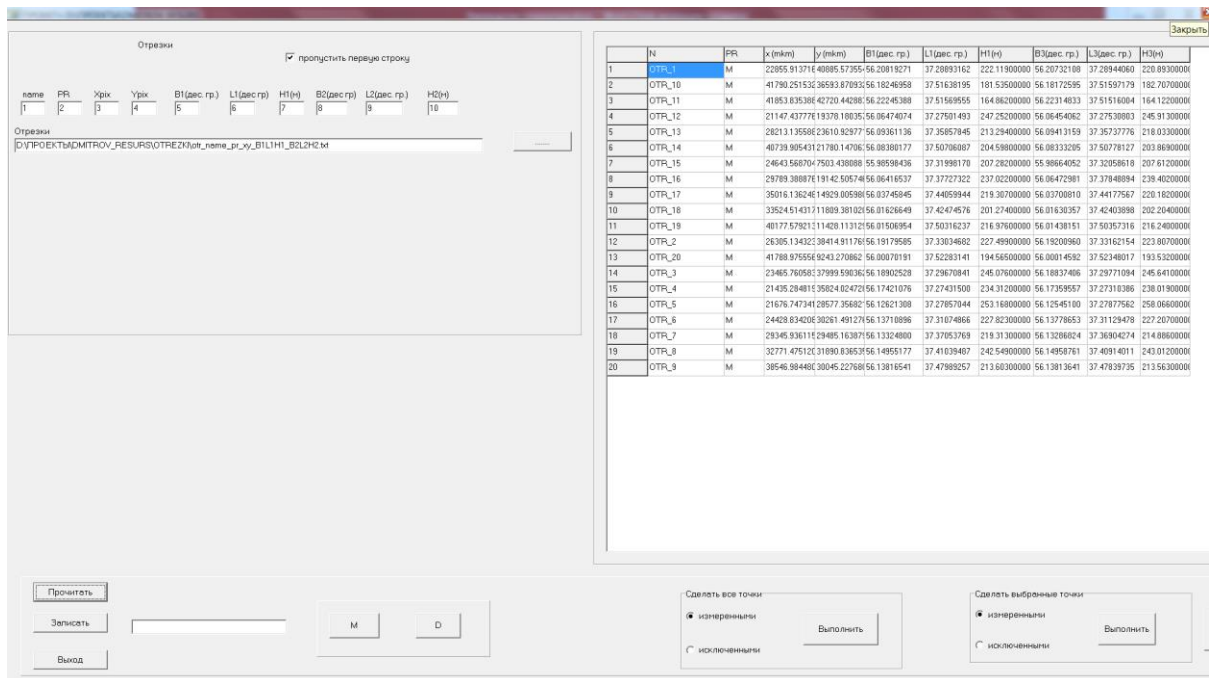


Рисунок А14б - Меню «Коррекция файлов»

В правом нижнем углу окна меню располагаются кнопки выбора статуса точек (измеренные или исключенные) с возможностью применения статуса ко всем точкам или выбранным.

После внесения изменений необходимо нажать кнопку «записать».

Меню «Рисовка»

Меню предназначено для графического отображения опорных данных и расчета взаимных углов пересечения отрезков.

Включает 3 подменю:

- рисовка;
- определение углов между отрезками;
- определение углов всех отрезков.

Меню «рисовка»

Исходными данными являются:

- файл граничных точек отрезков «otr_name_pr_xy_B1L1H1_B2L2H2.txt»;
- файл опорных точек «T_name_pr_xyBLH.txt»;
- файл RPC «RPC_GeoEye»;
- файл ЦМР (если доступен).

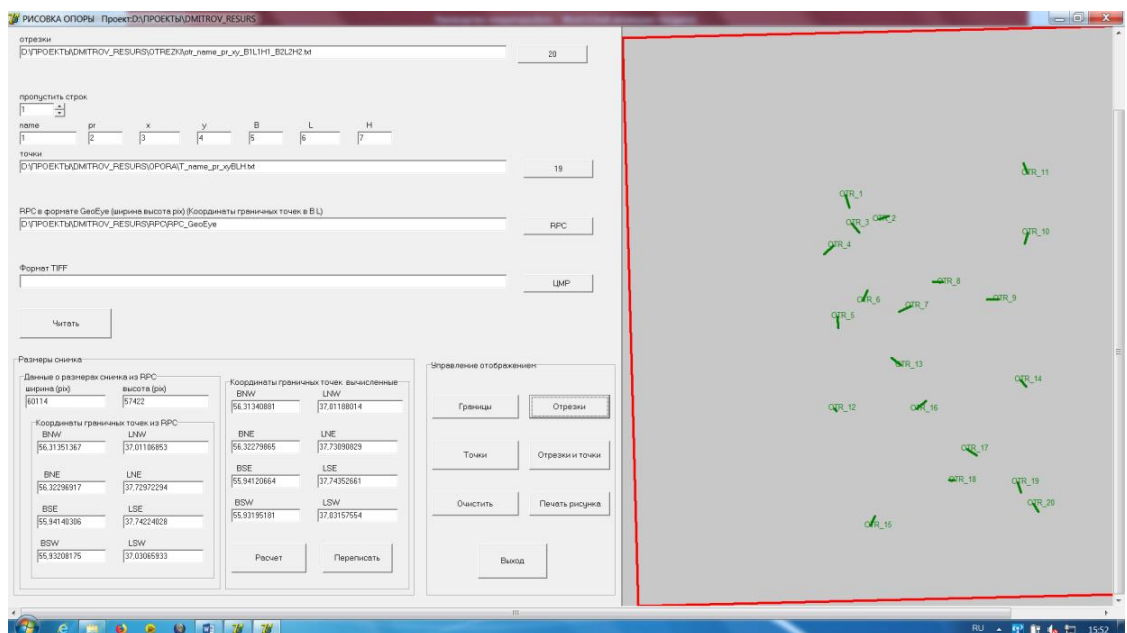


Рисунок А15 - Меню «рисовка»

При нажатии кнопки «читать» происходит загрузка и отображение границ снимка, координат углов снимка и количества отрезков и ОТМ. В полях «управление отображением» можно выбирать состав отображаемой информации (Рисунок А15).

Меню «определение углов между отрезками»

Исходными данными является граничных точек отрезков «otr_name_B1L1H1_B2L2H2.txt».

В меню есть поля выбора порядков номеров отрезков.

При нажатии кнопки «определить» в поле «угол» отображается значение угла между отрезками в градусной мере (Рисунок А16).

Рисунок А16 - Меню «определение углов между отрезками»

Меню «определение углов всех отрезков»

Исходными данными является граничных точек отрезков «otr_name_B1L1H1_B2L2H2.txt».

При нажатии кнопки «определить» в правой части окна отображаются значения порядковых номеров пар отрезков и взаимных углов между ними.

Доступна сортировка по величине угла и сохранение данных в табличной форме. (Рисунок А17).

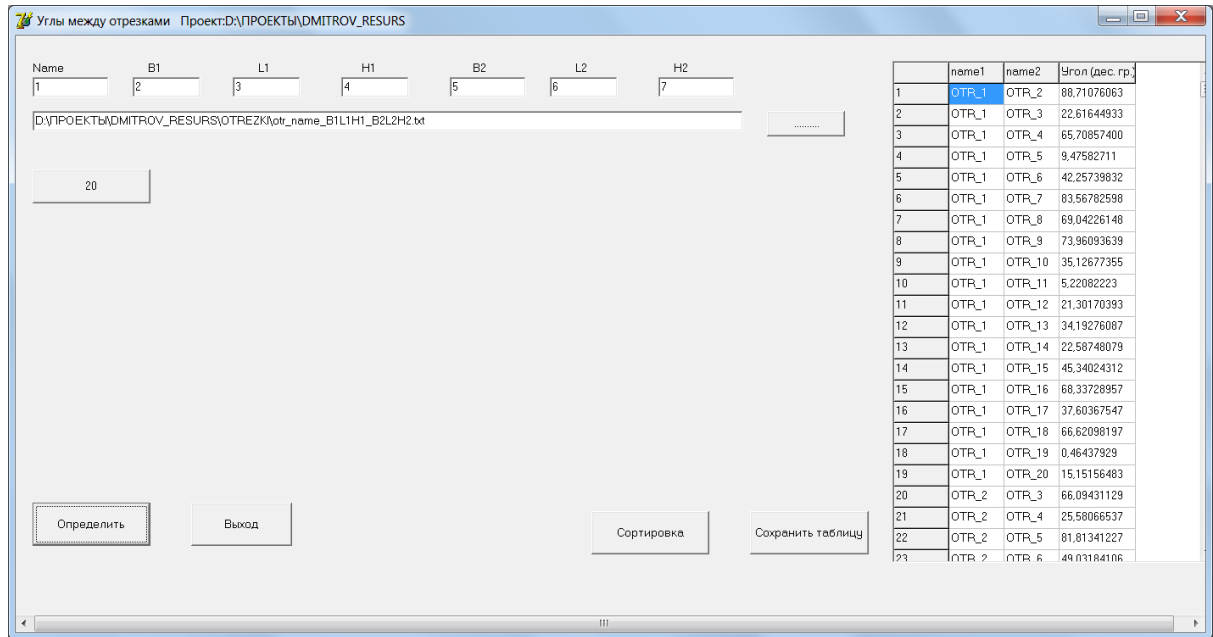


Рисунок А17 - Меню «определение углов всех отрезков»

Меню «Справка»

Окно справочной информации по работе с программным комплексом (Рисунок А18).

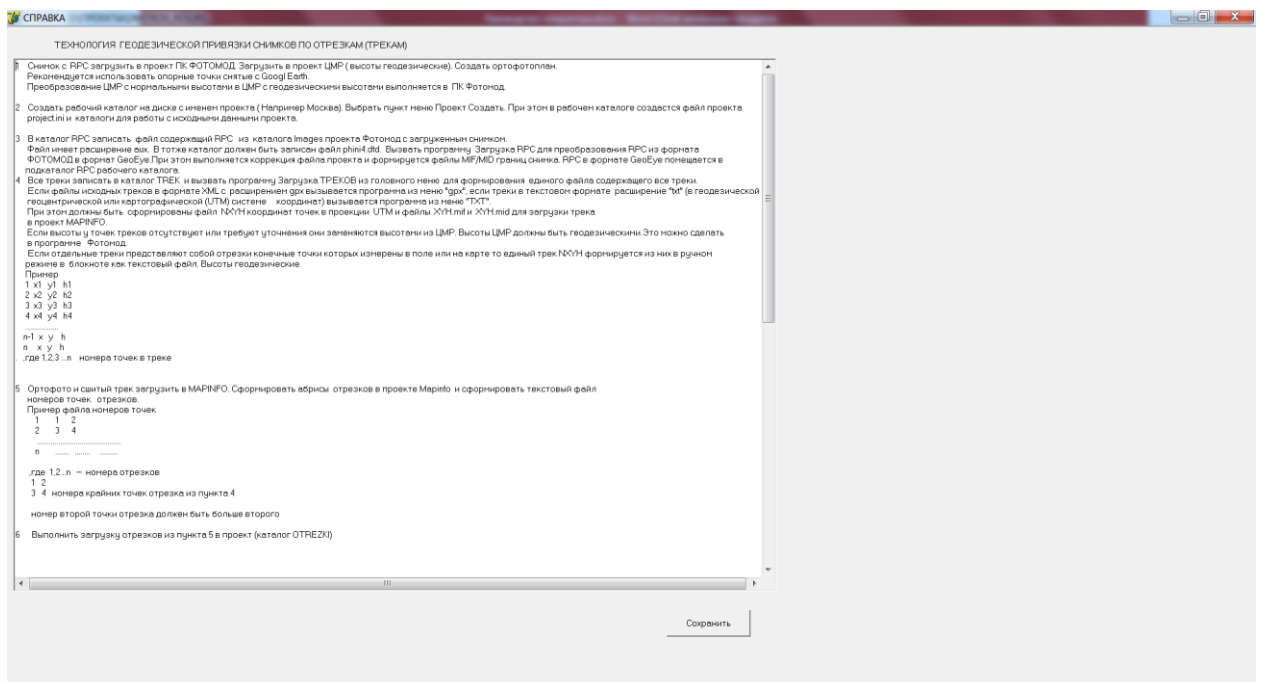


Рисунок А18 - Меню «Справка»

Папки, содержащие файлы проекта

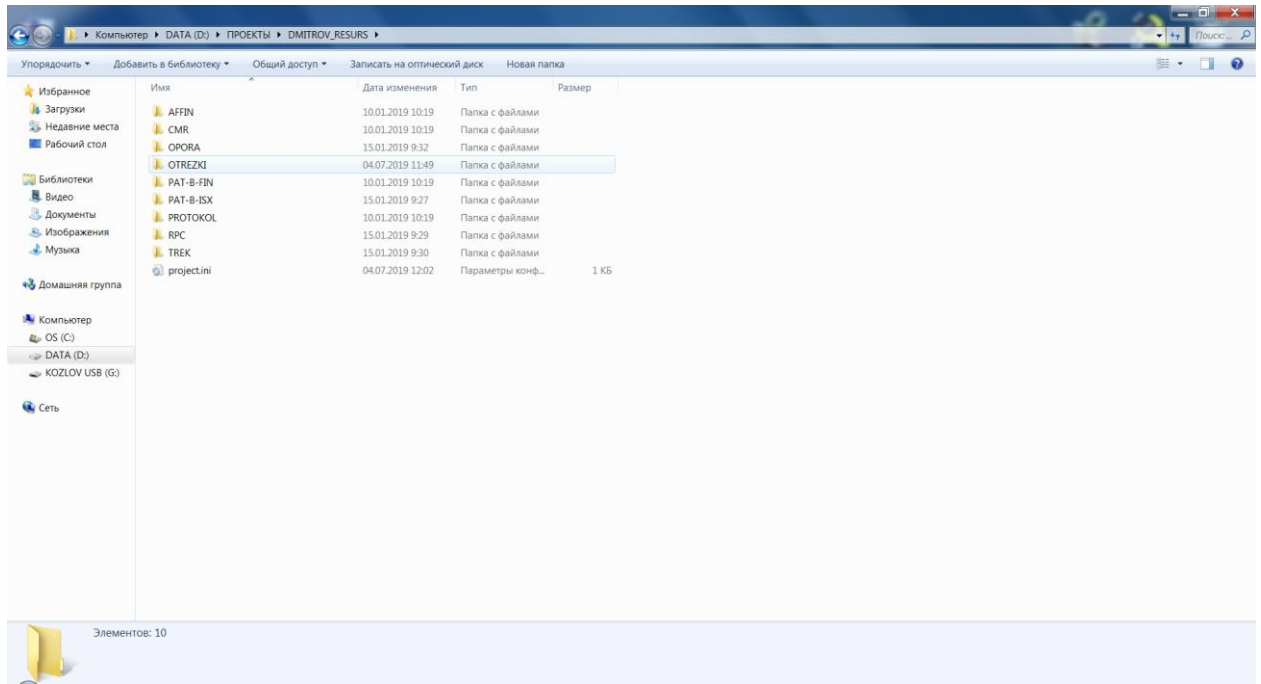


Рисунок А19 - Папки, содержащие файлы проекта.

Образец выходных данных

Таблица A1 - Невязки на опорных точках после определения аффинных поправок к модели RPC

Name	D_x (пиксель)	D_y (пиксель)	D_{xy} (пиксель)
OTR_1	-0,52576492	0,15517165	0,54818518
OTR_10	0,87121883	0,28485993	0,91660648
OTR_11	-0,07067297	0,02872087	0,07628602
OTR_12	0,15955508	-0,12226304	0,20101262
OTR_13	0,4220991	-0,51265689	0,66406681
OTR_14	-0,5018804	0,41028251	0,64824045
OTR_15	0,35264648	0,19357141	0,40228029
OTR_16	0,26696067	0,34114792	0,43318576
OTR_17	0,23919415	-0,33405833	0,41086349
OTR_18	0,00728172	-0,06307075	0,06348971
OTR_19	-0,31550009	0,09710277	0,33010491
OTR_2	0,30476237	1,08251459	1,12459679
OTR_20	-0,58987674	0,3654356	0,69390039
OTR_3	-0,37473818	0,30646144	0,48409433
OTR_4	-0,44965244	-0,51087868	0,68057648
OTR_5	-0,25039422	0,0347826	0,25279853
OTR_6	0,40085847	0,19134728	0,44418611
OTR_7	-0,03551847	-0,084894	0,09202474
OTR_8	0,09659544	-1,31065012	1,31420486
OTR_9	-0,00717387	-0,55292678	0,55297331

$CKO_x=0,379$

$CKO_y=0,477$

$CKO_{xy}=0,609$

Таблица А2 - Невязки на контрольных точках после определения аффинных поправок к модели RPC

Name	DX (пиксель)	DY (пиксель)	DXY (пиксель)
1	-0,02367	0,44198	0,442613
10	1,761791	-0,61934	1,867483
11	1,297291	-0,221	1,31598
12	0,971221	-0,12687	0,979472
2	0,716249	0,106	0,72405
3	1,461385	-0,52205	1,551831
4	0,834168	1,467863	1,68833
5	1,165594	-0,17542	1,178719
6	1,80406	-0,08937	1,806273
8	1,885269	1,948241	2,711067
9	0,266212	0,805121	0,847991
7	1,543295	0,226636	1,559847

СКОX=1,281
СКОY=0,797
СКОXY=1,509