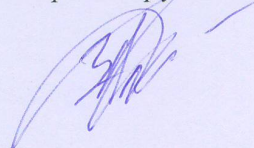


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

На правах рукописи



Захлебин Александр Сергеевич

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ОРТОФОТОПЛАНА МЕСТНОСТИ
ПО ВИДЕОДАНЫМ С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Специальность 2.2.6 Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Курячий Михаил Иванович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

Томск – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Методы построения ортофотоплана местности	13
1.1 Описание предметной области	13
1.2 Основные этапы развития аэрофотосъемочных систем	15
1.3 Проведение авиационных работ на БПЛА	19
1.3.1 Обследование территории	20
1.3.2 Расположение контрольных точек	20
1.3.3 Авиационные работы	22
1.3.4 Контроль полученного материала	22
1.4 Камеральная обработка результатов авиационных работ	23
1.4.1 Выравнивание аэрофотоснимков	23
1.4.2 Построение плотного облака точек	25
1.4.3 Построение карты высот	26
1.4.4 Построение ортофотоплана	27
1.5 Предобработка изображений, искаженных смазом	28
1.5.1 Винеровская фильтрация	29
1.5.2 Алгоритм Люси – Ричардсона	30
1.5.3 Регуляризация по Тихонову	31
1.5.4 Метод слепой деконволюции	31
1.6 Формулировка цели и задач работы	31
2 Методика проведения авиационных работ	33
2.1 Подготовительные работы	33
2.2 Создание контрольных точек на местности	35
2.3 Создание полетного задания	37
2.4 Предварительная настройка БПЛА	38
2.5 Авиационные работы	41
2.6 Полевой контроль полученного материала	43
2.7 Апробация методики	43
2.8 Основные результаты раздела	44

3	Методика обработки результатов аэрофотосъемки	45
3.1	Описание методики	45
3.2	Выравнивание аэрофотоснимков	45
3.3	Построение плотного облака точек	50
3.4	Построение карты высот	50
3.5	Построение ортофотоплана	51
3.6	Апробация метода обработки	51
3.7	Основные результаты раздела	52
4	Предварительная обработка изображений для повышения точности построения ортофотопланов местности.....	53
4.1	Проведение эксперимента.....	53
4.2	Моделирование и оценка функции рассеяния точки	57
4.3	Моделирование и устранение смаза на искусственно искаженных изображениях	60
4.3.1	Винеровская фильтрация	62
4.3.2	Восстановление по Люси – Ричардсону.....	65
4.3.3	Фильтрация по Тихонову	67
4.3.4	Слепая деконволюция	69
4.4	Обработка реальных изображений со смазом	73
4.5	Основные результаты раздела	77
5	Экспериментальное исследование методов построения ортофотопланов	79
5.1	Построение геопривязанного ортофотоплана местности с использованием опознавательных знаков	79
5.2	Построение геопривязанного ортофотоплана местности без использования опознавательных знаков	84
5.3	Комбинированная методика построения геопривязанного ортофотоплана местности.....	92
5.4	Подсчет объема насыпи полезных ископаемых	95
5.5	Построение цифровой модели полигона для испытания активно-импульсных телевизионных измерительных систем	99

5.6 Основные результаты раздела	106
Заключение	107
Сокращения, обозначения, термины и определения	109
Список использованных источников	110
Приложение А (обязательное) Копии документов	126

Введение

Актуальность работы

Современные методы проведения авиационных работ с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и построения геопривязанных ортофотопланов местности состоят из множества задач, таких как выбор БПЛА под конкретный объект исследования, составление полетного задания, расположение контрольных точек на объекте, проведение авиационных работ, камеральная обработка полученных данных и т.д. В зависимости от технического задания, применяя современные методы, можно получить геопривязанные ортофотопланы местности высокого пространственного разрешения с точной географической привязкой модели. Полученные ортофотопланы местности применяются во многих сферах деятельности человека: мониторинг, анализ и планирование, землеустроительные, кадастровые работы и т.д. Принцип их построения заключается в том, что БПЛА вертолетного либо самолетного типа с телевизионной камерой на борту совершает полет по заранее спланированному маршруту, при этом оптическая ось видеокамеры направлена вертикально вниз под углом 90 градусов. Галсы маршрутов построены таким образом, чтобы обеспечить достаточное поперечное перекрытие соседних аэрофотоснимков. Телевизионная камера работает в режиме интервального фотографирования с интервалом, достаточным для обеспечения необходимого продольного перекрытия соседних аэрофотоснимков.

Современные описания методов проведения авиационных работ и камеральной обработки полученных материалов носят общий характер и, в частном случае, не всегда обеспечивают высокое пространственное разрешение и точность географической привязки полученных растров. Неблагоприятные условия съемки и источники электромагнитных помех также негативно влияют на конечный результат. При выполнении авиационных работ и недостаточном освещении либо высокой скорости полета на полученных изображениях появляется смаз. Географическая привязка и дешифровка таких изображений становятся сложными задачами. Таким образом, поиск новых методов проведения

авиационных работ, построения ортофотоплана местности и их описания является весьма актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время ведутся исследования в области разработки как методов построения геопривязанных ортофотопланов местности, так и алгоритмов повышения их точности. Изыскания в этой области ведут многие отечественные и зарубежные ученые, в их числе А. Г. Абдульманов, В. К. Барбасов, А. С. Ессин, Б. В. Краснопевцев, М. Ю. Катаев, В. М. Курков, А. В. Коськин, А. Н. Лобанов, Ю. Н. Матвеев, Е. Г. Мещанинова, А. П. Михайлов, В. В. Погорелов, Т. Н. Скрыпицына, Р. М. Хрущ, А. Г. Чибуничев, Н. Altwaijry, S. Belongie, J. Fua, J. M. Kovacs, E. Trulls, C. Zhang и др.

Однако существующие методы направлены на использование калиброванных аэрофотосъемочных камер, применение которых в прикладных задачах не всегда рентабельно. Кроме того, практически не рассматриваются случаи, когда требуется получить ортофотоплан местности по изображениям, искаженным смазом, а авиационные работы проводятся в условиях с низкой освещенностью или высокой скоростью полета на низкой высоте.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются изображения, полученные с БПЛА. Предметом исследования являются искажения изображений с БПЛА при различных условиях съемки.

Цель и задачи диссертационной работы

Цель диссертационной работы – разработка методик и способа компенсации искажений на изображениях, полученных с БПЛА при различных условиях, для повышения точности географической привязки и контраста.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику проведения авиационных работ на БПЛА, которая включает в себя подготовку на местности (создание и определение точных координат контрольных точек), планирование и создание полетного задания с учетом особенностей рельефа местности, проведение авиационных работ совместно с радиотехническими измерениями.

2. Разработать методику камеральной обработки результатов аэрофотосъемки на основе взаимного использования контрольных точек и точных центров фотографирования с целью построения геопривязанного ортофотоплана местности, соответствующего требованиям по точности и разрешению масштаба 1:500.

3. Разработать методику и способ восстановления изображений, искаженных смазом в результате сложных условий съемки либо высокой скорости полета БПЛА, с целью повышения контраста и точности построения ортофотопланов местности на основании определения функции рассеяния точки.

4. Провести экспериментальные исследования разработанных методик и способа.

Научная новизна

1. Разработана методика построения ортофотоплана местности, отличающаяся совместным использованием контрольных точек и центров фотографирования.

2. Разработан способ определения функции рассеяния точки изображений с БПЛА, искаженных смазом, отличающийся использованием информации о параметрах полета и характеристиках видеокамеры.

3. Разработана методика компенсации смаза на изображениях с БПЛА, отличающаяся использованием полученной функции рассеяния точки, вычисленной с учетом априорной информации

Методы исследования

В настоящей работе применены экспериментальные и теоретические методы, заключающиеся в достижении определенных характеристик изображений, полученных в результате аэрофотосъемки, их обработке и последующем сравнении итоговых данных с результатами натурных испытаний с применением высокоточного поверенного геодезического оборудования.

Достоверность результатов

Достоверность результатов обусловлена методологической обоснованностью исходных теоретических положений, обеспечена организацией

опытно-экспериментальной работы с применением методов, адекватных предмету, целям и задачам исследования, и согласованностью теоретических положений и выводов с экспериментальными данными и результатами, подтверждена устойчивой повторяемостью основных результатов научных исследований.

Теоретическая значимость

1. Предложено аналитическое выражение для вычисления функции рассеяния точки по изображениям, полученным с БПЛА, имеющим инерциальную систему.

2. Предложена методика предобработки изображений со смазом, полученных с видеокамеры БПЛА.

3. Предложена методика проведения авиационных работ и камеральной обработки результатов аэрофотосъемки для построения геопривязанного ортофотоплана местности на основе взаимного использования контрольных точек и центров фотографирования.

Практическая значимость

1. Практически использовано предложенное аналитическое выражение определения функции рассеяния точки изображения, полученного с БПЛА при различной высоте полета, скорости и времени экспозиции.

2. Экспериментально подтверждена возможность построения геопривязанного ортофотоплана на основе взаимного использования контрольных точек и центров фотографирования.

3. Экспериментально подтверждена возможность дополнительного повышения контраста и точности геопространственных данных после устранения смаза на изображениях предложенной методикой.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика построения ортофотоплана местности с совместным использованием контрольных точек и центров фотографирования позволяет достичь точности определения координат объектов на местности ± 10 см.

2. Способ определения функции рассеяния точки при обработке изображений с БПЛА, искаженных смазом, позволяет повысить контраст объектов интереса в 2 раза.

3. Применение методики обработки изображений с БПЛА, искаженных смазом, использующей функцию рассеяния точки, полученную с учетом априорной информации, повышает точность построения ортофотоплана местности до 2,42 раза.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 139 страниц, включая 96 рисунков и 28 таблиц. Список литературы содержит 114 наименований.

Личный вклад автора

Задачи исследования были сформулированы совместно с научным руководителем работы, который оказывал консультативное содействие и осуществлял верификацию результатов в процессе выполнения работы. Личный вклад автора состоит в планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных результатов, формулировании выводов, разработке программного обеспечения, подготовке и публикации докладов и статей. Все результаты получены автором лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии.

Использование результатов исследования

1. Результаты работы использовались в проведении проектов межевания ряда населенных пунктов Томского района, что подтверждено актом внедрения от ООО «Земля и недвижимость», г. Томск.

2. Проведение комплексных испытаний активно-импульсной телевизионной измерительной системы и системы построения ортофотопланов местности беспилотным воздушным судном на полигоне НИИ РТС ТУСУР.

3. Договор № 651ГУЦЭС8-D3/63775 о предоставлении гранта на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив коммерческого использования результатов в рамках реализации инновационного проекта

«Разработка технологии подеревной таксации леса по данным аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов» программы УМНИК.

4. «Активно-импульсные телевизионные измерительные системы для навигации автономных мобильных роботов в сложных условиях видения», проект РНФ № 21-79-10200, выполняемый в ТУСУРе.

5. Проведение комплексных кадастровых работ на территории Томской области. Повышение точности географической привязки ортофотопланов местности разработанными методами. ООО «СИБГЕОПРОЕКТ», г. Томск.

6. Проведение комплексных кадастровых работ на линейном объекте (ЛЭП). ООО «ГЕОМАСТЕР», г. Томск.

7. Проведение комплексных кадастровых работ на территории Томской области. ООО «Экспертно-консультационный центр «Промышленная безопасность», г. Казань.

8. Создание цифрового двойника объекта культурного наследия. ООО «НПО СИБПРОЕКТАРХЕОЛОГИЯ», г. Томск.

9. Проведение комплексных кадастровых работ на территории Томской области. ООО «СИБГЕОПРОЕКТ», г. Томск.

Апробация результатов исследования

Основные положения данной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Международная научно-практическая конференция «Распознавание 2018», г. Курск, 2018.

2. XIV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2018.

3. XV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2019.

4. XVI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2020.

5. XVII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2021.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 10 работ: 2 статьи в журналах из перечня ВАК, 2 статьи в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 5 докладов в трудах международных конференций.

Краткое содержание работы

В введении представлена краткая характеристика работы.

В разделе 1 выполнен обзор литературы по теме диссертационного исследования, описаны принципы выполнения аэрофотосъемочных работ и построения геопривязанных ортофотопланов местности, а также методы повышения их точности. В разделе 2 описана методика подготовительных и авиационных работ на БПЛА с геодезическим приемником на борту и без него. Даны рекомендации по контролю радиотехнических данных, принимаемых со спутников. В разделе 3 описана методика построения ортофотоплана местности по точным центрам фотографирования совместно с контрольными точками в областях, где геодезический приемник с БПЛА принял искаженный сигнал со спутника во время выполнения полетного задания. В разделе 4 описана методика предобработки искаженных изображений в результате недостаточно короткой экспозиции видеокамеры, высокой скорости полета, а также неблагоприятных условий выполнения полетного задания. Предложен способ, позволяющий вычислять ФРТ, исходя из априорной информации о полете, основных параметров видеокамеры и съемки. Приведены результаты восстановления изображений различными методами. Оценена ошибка определения координат в контрольных точках на ортофотоплане местности, построенном по восстановленным изображениям. Оценена СКО яркости фона, а следовательно, и степень вносимых фильтрацией артефактов. Также оценено отношение яркости области интереса к СКО яркости фона при различных способах восстановления. В разделе 5 дано описание экспериментальных исследований по разработанным методикам. Приведены результаты испытаний с использованием опорных точек, без опорных точек и комбинированным методом. Показаны результаты применения разработанных методик при создании полигона для испытаний АИ ТИС.

Приведены результаты использования методик для подсчета насыпи полезных ископаемых. Далее приведены заключение, список сокращений и условных обозначений и список литературы. В приложении А представлены копии документов (свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ, акты использования результатов работы и сертификаты метрологической поверки геодезического оборудования).

1 Методы построения ортофотоплана местности

1.1 Описание предметной области

В настоящее время цифровые ортофотопланы местности являются основой для создания топографических планов и карт местности. С их помощью можно производить ряд землеустроительных и кадастровых работ, определять незаконно захваченные территории. В значительной степени увеличивается оперативность получения актуальной информации о местности, существенно сокращаются временные и финансовые затраты [0–5].

Ортофотоплан местности – фотографический план местности на точной геодезической основе, полученный путем ортотрансформирования аэрофотоснимков из центральной проекции в ортогональную. При создании ортофотоплана используют методы фотограмметрической обработки [6].

Фотограмметрия – научная дисциплина и область техники, предметом которой является получение геометрической и семантической информации об объектах фотограмметрической съемки по их фотограмметрическим снимкам.

Таким образом, фотограмметрической съемкой называется процесс получения изображения, в результате которого становится известна информация об объекте, который изображен на этом снимке.

С помощью методов фотограмметрии возможно обрабатывать изображения, как полученные в оптическом диапазоне, так и радиолокационном. Учитывая современный уровень развития программного обеспечения и методов фотограмметрической обработки, в современном обществе инструментом для фотограмметрической съемки может служить сотовый телефон с видеокамерой [7–11]. Методы фотограмметрии используют методы дистанционного зондирования. Дистанционное зондирование — это получение информации об удаленных объектах без прямого контакта с ними.

К достоинствам методов фотограмметрии можно отнести: высокую точность, которая обусловлена тем, что используемые съёмочные системы калибруются и их геометрия известна; высокую производительность, так как за короткий срок возможно получение информации о состоянии всего объекта и его отдельных

частей; объективность и достоверность результатов измерений, возможность оперативного получения измерений; безопасность выполнения работ, так как они производятся бесконтактным методом [12].

Одним из основных направлений методов фотограмметрии является получение геопривязанных ортофотопланов и цифровых моделей местности, а также исследование объектов на них [13, 14]. Благодаря удешевлению легких и сверхлёгких БПЛА вертолетного и самолетного типов появилась возможность выполнять построение ортофотопланов местности высокой точности (до 3 см в плане). Это соответствует требованиям по точности определения координат характерных точек границ земельного участка, а также контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке, изложенным в Приказе Минэкономразвития от 17 августа 2012 г. № 518 [15], а именно:

– земельные участки, отнесенные к землям населенных пунктов – не более 0,1 м;

– земельные участки, отнесенные к землям сельскохозяйственного назначения и предоставленные для ведения личного подсобного, дачного хозяйства, огородничества, садоводства, индивидуального гаражного или индивидуального жилищного строительства, – не более 0,2 м.

Исследование происходит в три основных этапа: фотограмметрическая съемка, геодезический этап, камеральная фотограмметрическая обработка.

По типу проведения фотограмметрической съемки различают: наземную фотограмметрическую съемку; аэросъемку и космическую съемку. При наземной съемке приборы устанавливаются на поверхность Земли. Это может быть как специальное фотограмметрическое оборудование, например фототеодолиты и специализированные фотоаппараты, так и обычные камеры. При аэросъемке она осуществляется с воздушного пространства, как с пилотируемого, так и с беспилотного аппарата. Космическая съемка производится с космических аппаратов [16–20].

На геодезическом этапе с помощью геодезических приборов либо картографическими методами определяются координаты в требуемой системе

координат точек, отобразившихся на снимке. В результате получается каталог контрольных точек, которые используются на следующем этапе.

На этапе камеральной фотограмметрической обработки получают необходимую модель по материалам съемки (карты, трехмерная модель, двухмерная модель).

Основная задача, которая решается при создании ортофотоплана, – приведение изображения к единому масштабу на всей площади [21].

1.2 Основные этапы развития аэрофотосъемочных систем

Первый аэрофотоснимок в мире сделал фотограф Гаспар Турнашон в 1855 г., за 100 лет до появления термина «дистанционное зондирование». Это был снимок Парижа, сделанный с воздушного шара на высоте 200 м. Чуть позже, в 1858 г., первую съемку с летательного аппарата он осуществил также над Парижем. На рисунке 1.1 изображен старейший аэроснимок, сохранившийся до наших дней, который сделал Джеймс Блэк с теплового аэростата в Бостоне в 1860 г.

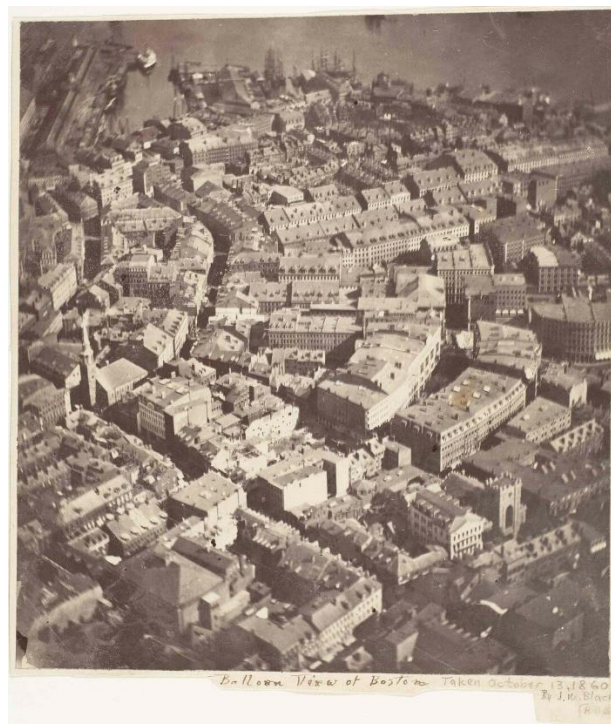


Рисунок 1.1 – Снимок г. Бостон (1860 г.)

В нашей стране 18 мая 1886 г. команда воздухоплателей под командованием военного инженера А. М. Кованько выполнили съемку Санкт-

Петербурга с воздушного шара (рисунок 1.2). В результате был получен снимок размером 12х16 см из раздвижного фотоаппарата с моментальным затвором.



Рисунок 1.2 – Первый аэроснимок Санкт-Петербурга с воздушного шара

Спустя два месяца по инициативе Русского технического общества аэронавтами А. М. Ковалько и Л. Н. Зверинцевым был осуществлен второй полет. Для этого эксперимента В. И. Срезневским была разработана специальная камера для аэросъемки. Она являлась предшественником более современных аэрофотоаппаратов. Камера была оснащена компасом для возможности производить ориентацию снимков и отсчета азимута. Фокус был настроен на бесконечность, размер фотокассет составлял 24х24 см.

Примерно в это же время было изобретено много успешных методов осуществления аэрофотосъемки как с участием человека, так и без него. Одним из

интересных способов было использование привязанных воздушных шаров, так как это уже был практически контролируемый полет на некотором расстоянии и можно было фотографировать и обследовать заранее выбранные объекты. В этом было главное отличие от свободного полета, где аэрофотосъемка во многом зависела от ветра и носила случайный характер.

Другим массовым инструментом для осуществления аэрофотосъемки были воздушные змеи. Свою популярность во всем мире они получили главным образом из-за простоты и дешевизны конструкции. Так, в России известным конструктором таких систем был капитан С. А. Ульянин. Воздушный змей коробчатой формы имел наибольшую подъемную силу и высокую устойчивость. Особой практической значимостью для русской армии обладала изобретенная Ульяниным парусная тележка с рекогносцировочным фотоаппаратом (рисунок 1.3).

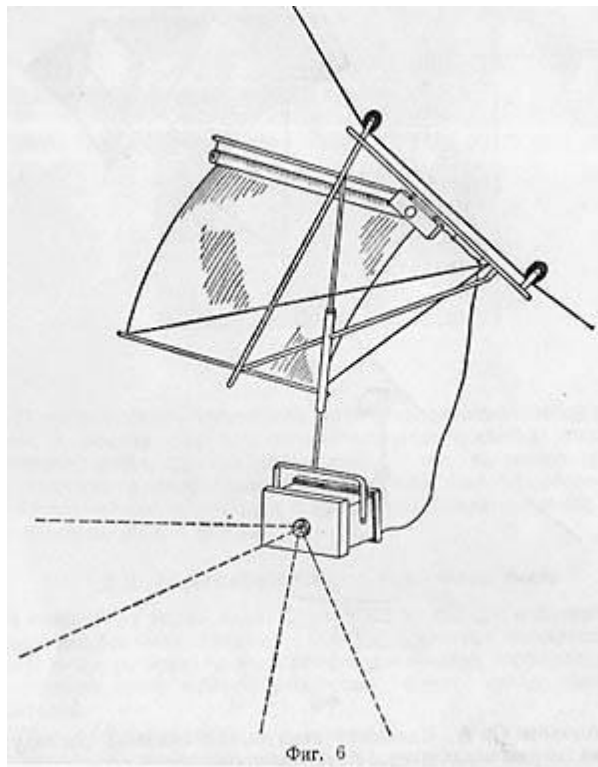


Рисунок 1.3 – Парусная тележка С. А. Ульянина

Для создания изображений использовалась камера с центральным затвором, длительностью экспозиции $1/250$ с и фокусным расстоянием объектива 270 мм. Фотопластины были увеличены до размеров 18x24 см.

Сама конструкция была выполнена из бамбуковой рамы и паруса. Конструкция подвешивалась к лееру, и под действием восходящих потоков воздуха осуществлялся подъем на нужную высоту.

В 1898 г. русский инженер Р. Ю. Тиле изобрел многокамерный автоматический фотоаппарат «панорамограф» (рисунок 1.4).

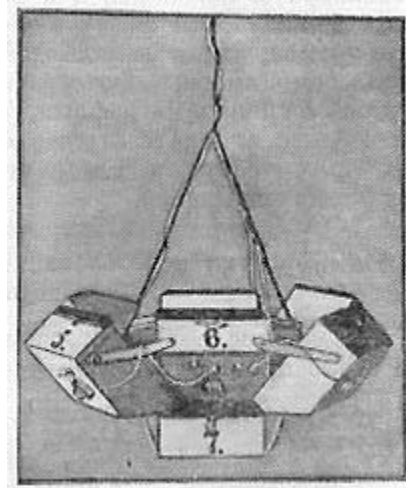


Рисунок 1.4 – Панорамограф Р. Ю. Тиле

Благодаря многокамерной системе продуктивность аэрофотосъемки увеличилась кратно. Такие аппараты стали применять в военных разведывательных целях.

В период Первой мировой войны широкое развитие и практическое применение получили конструкции, предназначенные для съемок с самолета. Так, самой совершенной системой на то время был первый в мире пленочный полуавтоматический аэрофотоаппарат, изобретателем которого был русский полковник В. Потте. Самолеты, оснащенные этим аэрофотоаппаратом, осуществляли маршрутную и площадную съемки.

В послевоенный период в СССР аэрофотосъемка стала применяться в гражданских целях. Поводом для этого послужило создание в 1919 г. Высшего военного управления, на базе которого создали аэрофототопографическое отделение. Отделение производило аэрофотосъемку для нужд лесоустройства и строительства дорожной сети [22–28].

В дальнейшем, с усовершенствованием фотограмметрического оборудования, аэрофотосъемка стала проводиться на больших площадях. Создавались специальные аэрофотосъемочные самолеты и камеры.

В 1926 г. на кафедре фототопографии Московского межевого института (ММИ) начали обучать студентов по специальности «Фототопография».

Были разработаны аналитические фотограмметрические приборы, состоящие из стереокомпаратора, электронной вычислительной машины и координатографа.

В 1988 г. был создан картоматериал всей страны в масштабе 1:2500.

Начиная с 1990-х гг. и по настоящее время фотограмметрия основывается на технологиях компьютерной обработки цифровых аэрофотоснимков и иных данных, получаемых в процессе подготовки и проведения аэрофотосъемочных работ [29–30].

1.3 Проведение авиационных работ на БПЛА

Для получения геопривязанного ортофотоплана местности, соответствующего масштабу 1:500 по разрешению и по точности, при проведении подготовительных и авиационных работ следует соблюдать определенные методики получения исходных данных. Если аэрофотосъемка проводится на БПЛА без установленного геодезического приемника на борту, при подготовке исследуемой местности следует обеспечить достаточное количество равномерно разнесенных на местности контрольных точек, которые используются в дальнейшей камеральной обработке для географической привязки ортофотоплана местности [31–35]. Также особую роль играет выбор съемочного оборудования и беспилотного летательного аппарата. В настоящее время в основном используются два типа БПЛА: самолетного и вертолетного типа. БПЛА самолетного типа отличаются более высокой производительностью и способны нести на своем борту более тяжелую полезную нагрузку. К недостаткам можно отнести высокую стоимость БПЛА самолетного типа по сравнению с вертолетным, а также необходимость наличия взлетно-посадочной площадки около объекта исследования, что не всегда осуществимо. Такой тип БПЛА используется в основном при съемке протяженных линейных или больших площадных объектов.

БПЛА вертолетного типа, как правило, стоят на порядок дешевле. Время их полета ограничено 20-40 минутами. На своем борту БПЛА вертолетного типа, как правило, в качестве полезной нагрузки имеют RGB-датчик изображений различного разрешения (12-20 Мп). Полезная нагрузка крепится на гиросtabilизированный подвес, что обеспечивает гашение вибраций, создаваемых во время полета от ветра и работы двигателей [36–42].

В общем случае для всех типов БПЛА процесс проведения подготовительных и авиационных работ выглядит следующим образом (рисунок 1.5).

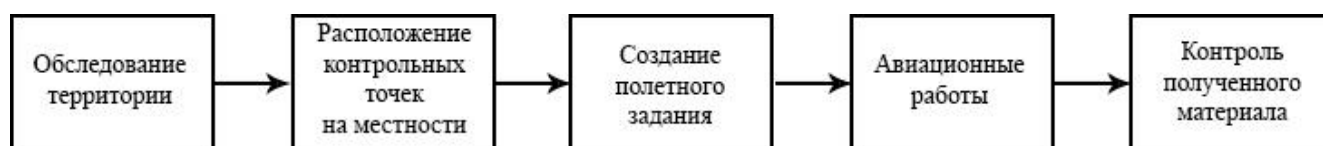


Рисунок 1.5 – Блок-схема основных этапов авиационных работ

1.3.1 Обследование территории

На этом этапе производится обследование исследуемой территории на местности. Оценивается рельеф местности, густота застройки, залесенность и т.д. Если нет возможности обследовать территорию физически, используют открытые источники информации, например спутниковые снимки, данные о рельефе и т.д. Проверяют наличие зон, запрещенных для полетов БПЛА. На основании собранной информации принимается решение о необходимом типе БПЛА для проведения работ. После анализа рельефа местности выбирают способ выполнения полета БПЛА: с учетом изменения подстилающей поверхности или на постоянной высоте относительно точки старта [43–45].

1.3.2 Расположение контрольных точек

Вне зависимости от того, какой тип БПЛА будет использован (самолетного или вертолетного типа, с геодезическим приемником на борту или без него) на местности располагаются контрольные точки, координаты которых точно определены спутниковым геодезическим оборудованием. Контрольными точками могут являться любые локальные легко детектируемые на снимках объекты, как естественного происхождения (дорожная разметка, канализационный люк и т.д.),

так и искусственно созданные, например контрастный круг небольшого размера, контрастный крест и т.д. [46].

Если на исследуемой территории присутствует зона покрытия сотовой связи или между роверным приемником и базовой станцией налажена радиосвязь, координаты контрольных точек могут быть определены в реальном времени в режиме Real Time Kinematic (RTK). Если сотовая и радиосвязь отсутствует, то прибегают к измерениям координат контрольных точек в режиме Post Processing Kinematic (PPK) [47–50].

Расположение контрольных точек строго не регламентируется, чем их больше, тем качественней можно определить точность итогового ортофотоплана местности на отдельно взятых участках.

Если полеты планируется осуществлять на БПЛА без геодезического приемника на борту, то количество контрольных точек выбирается максимальным, так как половина из них будет использована для географической привязки растра, а другая – для проверки точности его географической привязки.

Создание полетного задания. Для создания полетного задания используется различное специализированное ПО, как бесплатное, так и коммерческое. Основные отличия заключаются в объеме функционала. Так, некоторое ПО позволяет не только создавать полетные задания, но и контролировать параметры экспозиции непосредственно во время полета.

Во время создания полетного задания следует учитывать рельеф исследуемой местности, так как при изменчивом рельефе можно не только нарушить взаимное перекрытие снимков, например, если не учитывать наличие холмов, но и совершить аварию. В этом случае следует планировать высоту полета БПЛА по рельефу местности, где за ноль метров принимается точка старта БПЛА.

Такой параметр, как высота полета, выбирается исходя из параметров видеокамеры, установленной на БПЛА, и требования по конечному разрешению будущего ортофотоплана местности (оно измеряется в сантиметрах на пиксель).

Продольное и поперечное перекрытие аэрофотоснимков выбирается из характера подстилающей поверхности. При городской застройке требования к

перекрытию возрастают и могут достигать 80% продольного перекрытия аэрофотоснимков и 70% – поперечного. Чем более гладкий рельеф и чем меньше расположенных на нем объектов, тем меньше выбирается перекрытие. Например, для сельскохозяйственных полей оно составляет примерно 70% продольного и 55% поперечного перекрытия изображений [51–54].

1.3.3 Авиационные работы

Непосредственно перед выполнением авиационных работ происходит предполетный контроль основных узлов БПЛА. Проверяется работоспособность двигателей, инерциальной системы, целостность силовой конструкции, работа видеокамеры.

Во время полета БПЛА осуществляет движение согласно загруженному полетному заданию. Оператор отслеживает основные параметры телеметрии, когда необходимо, меняет параметры экспозиции, наиболее подходящие под условия освещенности местности.

1.3.4 Контроль полученного материала

После посадки БПЛА важно выполнить контроль полученного материала. К нему относится просмотр полученных изображений местности, а также данных с ГНСС-модуля.

БПЛА обоих типов при осуществлении съемки сталкиваются с проблемой появления на изображениях различных искажений. Природа искажений в основном связана с неидеальностью оптической системы видеокамер, установленных на БПЛА, например, наблюдается дисторсия на краях изображений. Также проблемой является смаз изображений, вызванный недостаточно короткой экспозицией при съемке с движущегося БПЛА. В результате появления смаза на изображениях нарушается их субъективное восприятие, а также уменьшается точность географической привязки конечного ортофотоплана местности [55–59]. Искажение изображений также происходит, когда на БПЛА установлена камера с КМОП-сенсором и считывающим затвором (rolling shutter) [60–62]. Ниже данные проблемы рассмотрены более подробно. Также при проведении авиационных работ

важно, чтобы данные, получаемые от наблюдения за спутниками, не были искажены сильнее пороговых значений. В противном случае, если на БПЛА установлен геодезический приемник и географическую привязку изображений планируется выполнять по полученным с него данным, точность таких ортофотопланов местности будет крайне низкая. Для исправления ошибок может потребоваться выполнение повторных авиационных работ или получение координат контрольных точек на местности, что не всегда реализуемо.

1.4 Камеральная обработка результатов авиационных работ

Результатами авиационных работ, как правило, являются аэрофотоснимки, данные наблюдения за спутниками с борта БПЛА и с базовой станции, расположенной на точке с известными координатами, а также точные координаты опорных точек на местности, которые используются для привязки будущего ортофотоплана местности или для проверки точности готового ортофотоплана. Далее представлены основные этапы обработки результатов авиационных работ.

1.4.1 Выравнивание аэрофотоснимков

На этом этапе определяются положения аэрофотоснимков в системе координат объекта или географической системе координат по элементам внутреннего и внешнего ориентирования снимков [63–66].

Элементы внутреннего ориентирования (рисунок 1.66):

f – фокусное расстояние снимка;

x_0 и y_0 – координаты главной точки снимка O .

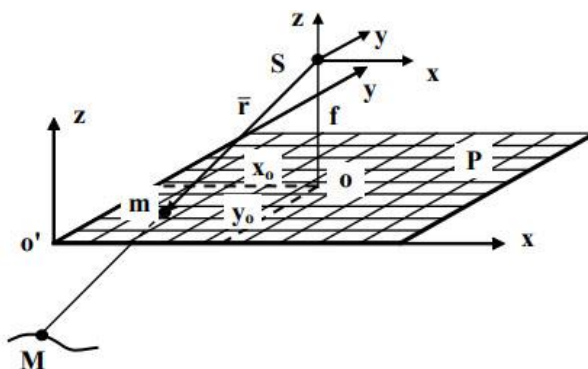


Рисунок 1.6 – Элементы внутреннего ориентирования снимка

Точка S является началом системы координат снимка. На кадровом снимке измерение координат точек выполняется системой координат матрицы цифровой фотокамеры $o'xyz$. По элементам внутреннего ориентирования определяется положение центра проекции S в системе координат снимка $o'xyz$. Через эту точку проходят все проектирующие лучи.

С помощью шести элементов внешнего ориентирования определяют положение снимка в пространстве (рисунок 1.77).

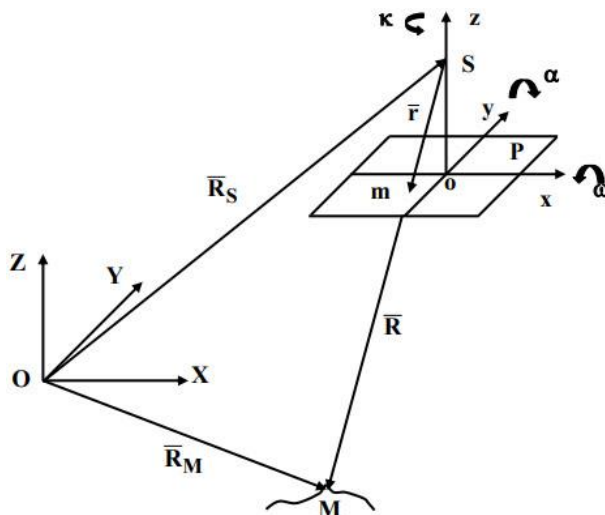


Рисунок 1.7 – Элементы внешнего ориентирования снимков

Элементы внешнего ориентирования снимка:

X_s, Y_s, Z_s – координаты центра проекции S в системе координат объекта $OXYZ$;

ω, α, κ – углы поворота системы координат снимка $o'xyz$ относительно системы координат объекта $OXYZ$.

Координаты точек объекта и их изображений на снимке связаны векторным уравнением, которое называется уравнением коллинеарности:

$$\bar{R} = \bar{R}_s + \bar{R} \quad (1.1)$$

или в координатной форме:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s + (Z - Z_s) \frac{X'}{Y'} \\ Y &= Y_s + (Z - Z_s) \frac{X'}{Y'} \end{aligned} \right\}, \quad (1.2)$$

где X, Y, Z – координаты точки M в системе координат объекта;

X_s, Y_s, Z_s – координаты центра проекции S в системе координат объекта;

X', Y', Z' – координаты вектора r в системе координат объекта, которые определяются по формуле:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{pmatrix}, \quad (1.3)$$

где A – матрица преобразования координат (матрица направляющих косинусов), элементы c_{ij} которой определяются по значениям угловых элементов внешнего ориентирования снимка ω, α, κ .

С учетом вышесказанного уравнение коллинеарности имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s + (Z - Z_s) \frac{c_{11}(x - x_0) + c_{12}(y - y_0) - c_{13}f}{c_{31}(x - x_0) + c_{32}(y - y_0) - c_{33}f} \\ X &= Y_s + (Z - Z_s) \frac{c_{21}(x - x_0) + c_{22}(y - y_0) - c_{23}f}{c_{31}(x - x_0) + c_{32}(y - y_0) - c_{33}f} \end{aligned} \right\}. \quad (1.4)$$

Координаты точек объекта определяются выражением (1.4), если известны элементы внешнего ориентирования и высоты точек [67–73].

В данной работе элементы внешнего ориентирования снимков были известны. Они были получены на этапе авиационных работ, так как на БПЛА установлен геодезический спутниковый приемник и инерциальная система. В результате оптимизации выравнивания аэрофотоснимков полученные данные используют при построении сети фототриангуляции методом независимых связок.

В результате операции выравнивания получается разреженное облако точек и данные о положении и ориентации аэрофотоснимков. Эти данные используются на дальнейших стадиях построения ортофотоплана местности.

1.4.2 Построение плотного облака точек

Плотное облако точек представляет собой точки с известными координатами X, Y, Z в системе координат объекта и яркости взятые из исходных изображений.

Классическим методом построения является метод полуглобального отождествления Semi-global matching (SGM). На рисунке 1.88 приведена схема построения плотного облака точек и проиллюстрирована работа этого алгоритма.

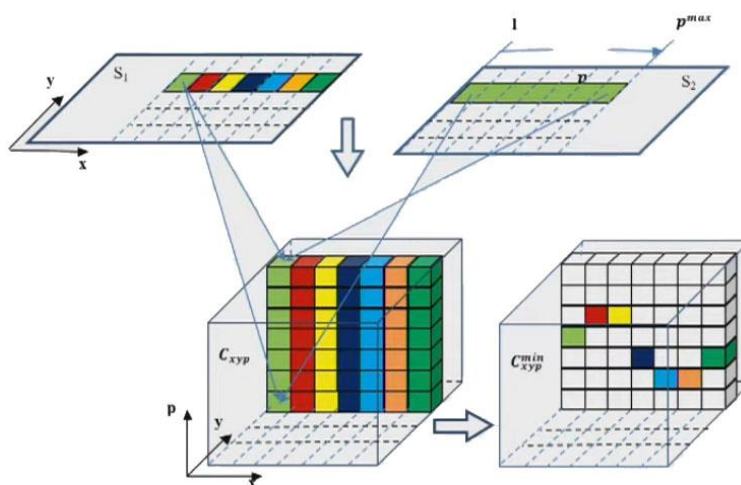


Рисунок 1.8 – Схема построения плотного облака точек

Алгоритм основан на обработке отдельных стереопар, которые заранее трансформируются вдоль базисных линий. В результате каждый пиксель на левом снимке находится на соответствующей линии на правом снимке. Задача состоит в нахождении соответствующих друг другу пикселей на левом и правом снимках. Пиксели сравниваются, и далее записывается соответствующая разность, которая называется стоимостью отождествления. Она выражена в разности яркости соответствующих пикселей на левом и правом изображениях:

$$C_{xyp} = D_{xy}^1 - D_{xy}^2 . \quad (1.5)$$

Данные записываются в пространственно-воксельной структуре. Операция проводится над всеми пикселями и получается общая структура стоимостей отождествления. Эти стоимости анализируются на предмет выявления минимальных значений. Таким образом для каждого пикселя находится соответствующий продольный параллакс. Решая прямую фотограмметрическую засечку, находят X , Y , Z в системе координат объекта [74–77].

1.4.3 Построение карты высот

Карта высот строится на основании плотного облака точек и представляет собой регулярную сетку значений высот и координат. С помощью карты высот

возможно определение координат точек и их высоты, а также расстояний, площадей, объемов и построение контурных линий [78].

1.4.4 Построение ортофотоплана

Ортофотоплан местности получается путем ортотрансформирования аэрофотоснимков из центральной проекции в ортогональную (картографическую).

Исходными материалами при цифровом ортотрансформировании снимков служат: исходные цифровые аэрофотоснимки, цифровая модель местности (карта высот), элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимков [79–83]. Основные процессы ортотрансформирования представлены на рисунке 1.9.

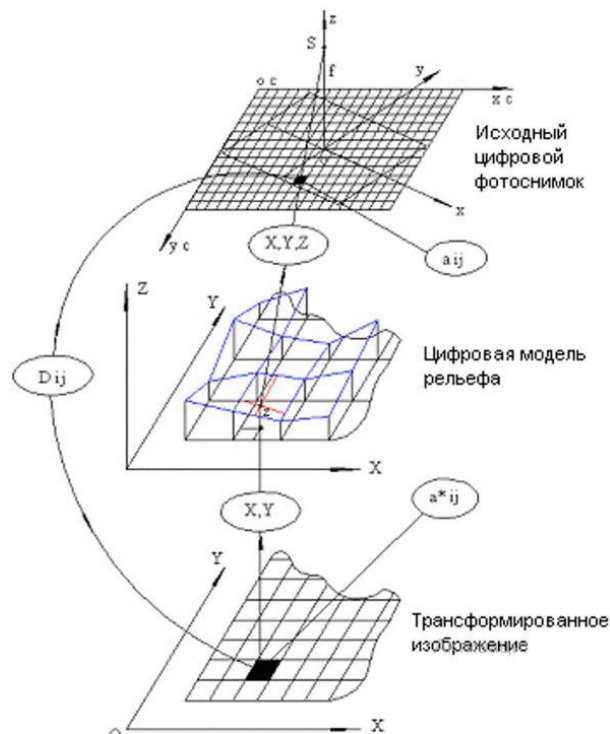


Рисунок 1.9 – Основные процессы ортотрансформирования изображения

Изначально задается первоначальная матрица трансформированного изображения. Зная координаты пикселей на исходных изображениях, параметры их внешнего ориентирования и высотную отметку из карты высот этих пикселей [84, 85], согласно выражению (1.4), попиксельно заполняют матрицу трансформированного изображения.

Аэрофотоснимки используются для построения геопривязанных ортофотопланов местности. Существуют два основных подхода географической привязки аэрофотоснимков. Это прямая и обратная фотограмметрическая засечка.

Современное ПО для фотограмметрической обработки изображений или результатов спутниковых наблюдений успешно справляется с этой задачей, когда исходные данные не подвержены сильным искажениям.

1.5 Предобработка изображений, искаженных смазом

Если используется недостаточно короткая выдержка или высокая скорость полета, в результате прямолинейного движения камеры, установленной на БПЛА, на изображениях появляется смаз, который можно считать прямолинейным и инвариативным к сдвигу [86–88].

В общем случае искаженное изображение выглядит следующим образом:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y), \quad (1.6)$$

где $f(x, y)$ – функция исходного изображения;

$h(x, y)$ – функция рассеяния точки;

(*) – операция свертки;

$n(x, y)$ – функция аддитивного шума.

В интегральном виде уравнение можно представить так:

$$I(x, y) = \iint_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} I(x', y') \cdot h(x - x', y - y') dx' dy', \quad (1.7)$$

где $I(x', y')$ – функция исходного изображения;

$h(x - x', y - y')$ – функция рассеяния точки.

В пространственной области это же изображение можно представить следующим образом:

$$G(u, v) = H(u, v) * F(u, v) + N(u, v), \quad (1.8)$$

где $H(u, v)$ – фурье-образ исходного изображения;

$F(u, v)$ – фурье-образ функции рассеяния точки;

$N(u, v)$ – фурье-образ шума.

Чтобы устранить смаз на изображениях, требуется выполнить оценку функции рассеяния точки. Различают три способа оценки искажающей функции.

1. Визуальный анализ. Для этого требуется найти фрагмент изображения с большой амплитудой сигнала, т.е. с высоким контрастом. Если изображение размыто, убрать размытость фильтрами.

2. Оценка на основе эксперимента. Применяется в том случае, если есть доступ к оборудованию, на котором производилась съемка. В этом случае можно измерить импульсный отклик на светящуюся точку.

3. Оценка на основе моделирования. Такой способ является труднореализуемым, т.к. современные объективы состоят из множества линз с разными характеристиками преломления лучей. С учетом переотражений и влияния диафрагмы такой подход практически нереализуем [86–88].

Классическими методами восстановления изображений с использованием искажающей функции являются: метод максимального правдоподобия Люси – Ричардсона, параметрический фильтр Винера, регуляризация по Тихонову и пр. Когда речь идет об аэрофотоснимках, полученных с БПЛА, искажающая функция заранее неизвестна. По этой причине лучше использовать методы слепой деконволюции [89, 90]. В этом случае стараются выделить как можно больше априорной информации, чтобы сделать предположение о характере смаза. Также имеет место итеративное уточнение искажающей функции для максимального приближения к исходному изображению $f(x, y)$. При смазе каждый пиксель исходного изображения превращается в линию, форма этой линии и показывает, по какому закону искажается изображение, т.е. является импульсной характеристикой двумерного фильтра $h(x, y)$.

1.5.1 Винеровская фильтрация

Фильтр Винера одновременно учитывает свойства искажающей функции и статистических свойств шума в процессе восстановления изображений. Метод рассматривает изображение как случайный процесс. Задачей восстановления является нахождение оценки $\hat{f}(x, y)$ для неискаженного изображения $f(x, y)$, чтобы среднеквадратическое отклонение этих величин относительно друг друга было минимальным [91, 92].

Среднеквадратическое отклонение e задается по формуле:

$$e^2 = E\{((f(x, y) - \widehat{f(x, y)}))^2\}, \quad (1.9)$$

где $E\{\cdot\}$ обозначает математическое ожидание своего аргумента.

При этом должны быть выполнены следующие условия:

- 1) неискаженное изображение и шум некоррелированы между собой;
- 2) нулевое среднее значение имеет шум либо неискаженное изображение;
- 3) должна быть обеспечена линейная зависимость оценки искаженного изображения.

В этом случае минимум среднеквадратического отклонения достигается для оценивающей исходное изображение функции, заданной в частотной области следующим образом:

$$\hat{F}(u, v) = \left(\frac{1}{H(u, v)} \cdot \frac{|H(u, v)^2|}{|H(u, v)^2| + \frac{S_\eta(u, v)}{S_f(u, v)}} \right) G(u, v), \quad (1.10)$$

где $G(u, v)$ – фурье-преобразование искаженного изображения;

$|H(u, v)^2|$ – энергетический спектр искажающей функции;

$S_\eta(u, v)$ – энергетический спектр шума;

$S_f(u, v)$ – энергетический спектр неискаженного изображения.

Стоит отметить, что если шум равен нулю, то и его энергетический спектр обращается в нуль, и в этом случае винеровская фильтрация сводится к инверсной фильтрации. Также проблема нулей в спектре искажающей функции при использовании винеровского фильтра не возникает.

1.5.2 Алгоритм Люси – Ричардсона

Особенность данного алгоритма заключается в том, что он является итеративным. Метод реализует решение задачи максимального правдоподобия. Формула для формирования оценки исходного сигнала на шаге $t+1$ соответствует следующему выражению:

$$\widehat{f_{k+1}} = \widehat{f_k}(x, y) \left(\frac{g(x, y)}{h(x, y) * \widehat{f_k}(x, y)} * h(-x, -y) \right). \quad (1.11)$$

На основании каких-либо эмпирических критериев выбирается число итераций [93–96].

1.5.3 Регуляризация по Тихонову

Регуляризация по Тихонову является сглаживающей фильтрацией методом наименьших квадратов со связью. Идея заключается в формулировке задачи в матричном виде с дальнейшим решением соответствующей задачи оптимизации [97–99]. Решение выглядит следующим образом:

$$\widehat{F}(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + \gamma |P(u, v)|^2} G(u, v), \quad (1.12)$$

где $P(u, v)$ – фурье-образ оператора Лапласа,

γ – параметр регуляризации, который подбирается вручную.

1.5.4 Метод слепой деконволюции

Восстановление изображений методом слепой деконволюции больше подходит для случаев, когда нет априорной информации об искажающей функции, а лишь только делается предположение о ней [100]. Алгоритм восстанавливает одновременно изображение и функцию рассеяния точки. Также используются дополнительные характеристики видеокамеры.

1.6 Формулировка цели и задач работы

В данной главе проведен аналитический обзор литературы, описана предметная область. Приведены существующие методы проведения авиационных работ и камеральной обработки результатов аэрофотосъемки для создания геопривязанных ортофотопланов местности.

На основании изложенного сформулирована цель диссертационной работы: разработка методики компенсации искажений на изображениях, полученных с БПЛА при разных условиях для повышения точности географической привязки и контраста.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику проведения авиационных работ на БПЛА, которая включает в себя подготовку на местности (создание и определение точных координат контрольных точек), планирование и создание полетного задания с учетом особенностей рельефа местности, проведение авиационных работ совместно с радиотехническими измерениями.

2. Разработать методику камеральной обработки результатов аэрофотосъемки на основе взаимного использования контрольных точек и точных центров фотографирования с целью построения геопривязанного ортофотоплана местности, соответствующего требованиям по точности и разрешению масштабу 1:500.

3. Разработать методику и способ восстановления изображений, искаженных смазом в результате сложных условий съемки либо высокой скорости полета БПЛА, с целью повышения контраста и точности построения ортофотопланов местности на основании определения функции рассеяния точки.

4. Провести экспериментальные исследования разработанных методик и способа.

2 Методика проведения авиационных работ

2.1 Подготовительные работы

В работе рассматривается методика, при которой конечной целью аэрофотосъемки является построение геопривязанного ортофотоплана местности масштаба 1:500 с телевизионной камеры БПЛА вертолетного типа и геодезическим приемником на борту либо со штатным GPS-приемником. Результаты исследования опубликованы в [101, 102]. Структурная схема реализации данной методики приведена на рисунке 2.1.

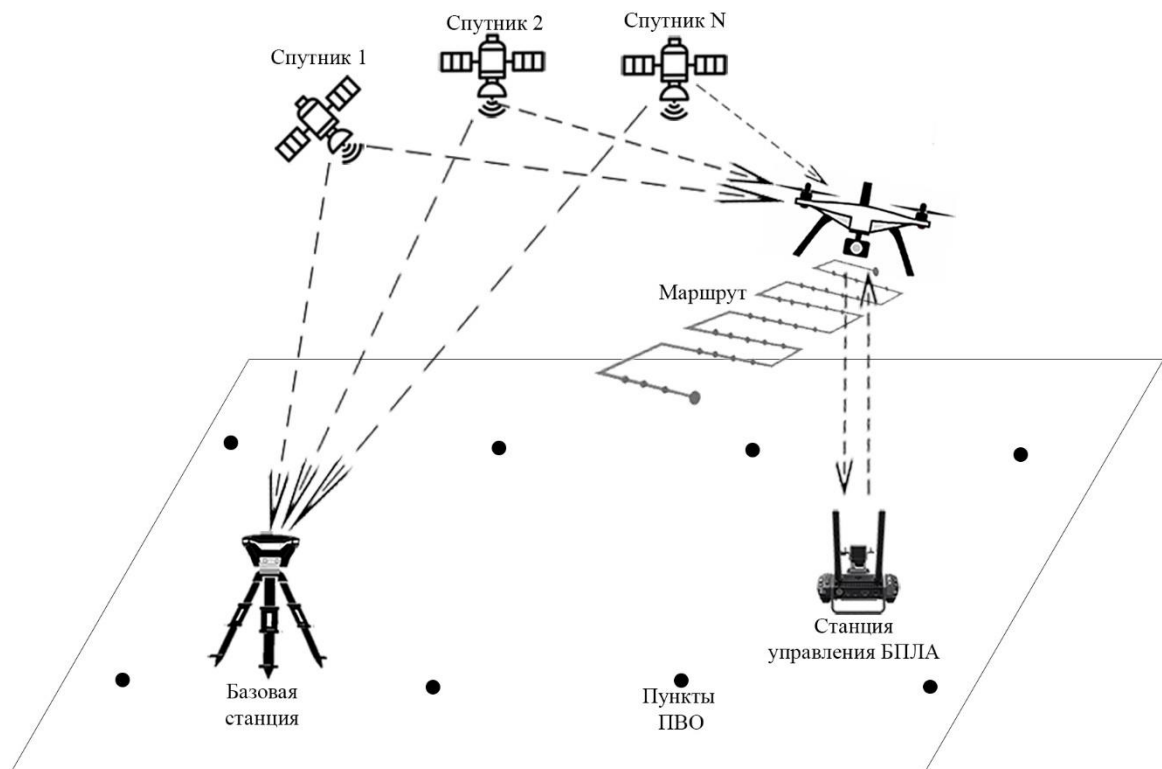


Рисунок 2.1 – Схема предлагаемой методики

Ниже более подробно рассматривается каждый из этапов предлагаемой методики.

Принцип определения координат в режимах RTK и PPK. В настоящее время спутниковые приемники внедрены в огромное количество современных гаджетов, например, таких как мобильный телефон, умные часы, автомобильные навигаторы и т.д. В этом случае речь идет о бытовых спутниковых приемниках с низкой точностью определения географических координат, которые определяют местоположение автономно. Для вычисления координат приемнику необходимо

принимать сигналы минимум 4 спутников, расположенных равномерно на небосводе. Устройство, вычисляя расстояние, а точнее псевдорасстояние, до спутников, определяет собственное положение. Точность определения координат зависит от класса применяемого оборудования и изменяется от субметровой до сотен метров.

Если требуется более высокая (сантиметровая) точность измерения координат, применяются геодезические приемники. В этом случае используются два приемника, а измерения называются относительными. Вычисляются координаты одного приемника (ровера) относительно другого (базы), точные координаты которого известны. Определение координат, как правило, происходит в двух режимах, в зависимости от задачи: RTK (от англ. Real Time Kinematic – кинематика в реальном времени); PPK (от англ. Post Processing Kinematic – кинематика в постобработке). Принцип работы показан на рисунке 2.2.

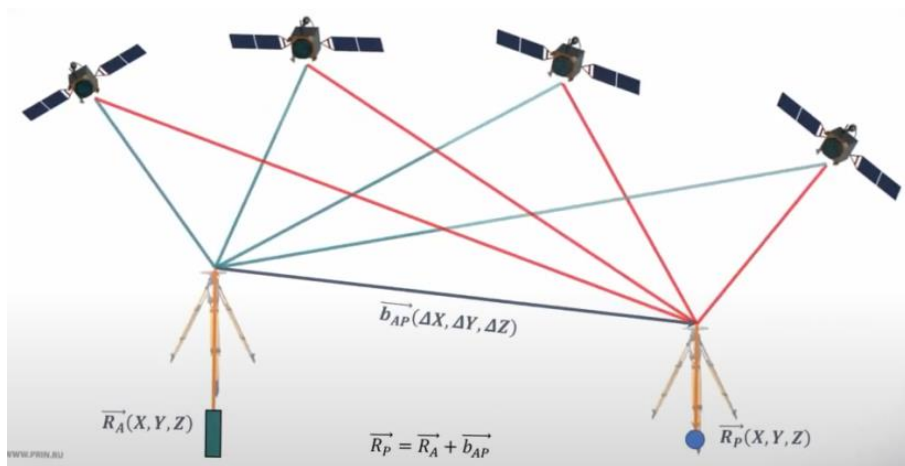


Рисунок 2.2 – Принцип работы RTK/PPK

Определение точных географических координат объектов в режиме PPK

Базовая станция устанавливается в точке с известными координатами. Ровер находится на определяемой точке. Два приемника одновременно записывают данные о местоположении спутников и измерения с них. Затем в результате лабораторной обработки этих измерений вычисляется приращение координат от фазового центра антенны базы до фазового центра антенны ровера, т.е. ΔX , ΔY , ΔZ , как на рисунке 2.2.

Определение точных географических координат объектов в режиме RTK

Данный режим определения координат и высот точек с сантиметровой точностью основывается на том, что аппаратура пользователя принимает измерения в режиме реального времени во время измерений от базовой станции. Обработка данных осуществляется в реальном времени на контроллере ровера. Информация от базовой станции к роверу может передаваться через модем по технологии CSD, радио либо мобильного интернета.

В обоих случаях приемники должны отслеживать как можно больше одинаковых спутников.

2.2 Создание контрольных точек на местности

Для проверки ортофотоплана местности либо его привязки используются контрольные точки. Они представляют собой контрастные точки на местности, которые легко детектируются при камеральной обработке снимков. В качестве контрольных точек, как правило, используют контрастные диски, закрепленные на поверхности земли, или нарисованные краской круги диаметром 10–15 см. Если на борту БПЛА нет высокоточной ГНСС-платы и геопривязка модели будет осуществляться по опознавательным знакам, контрольные точки рекомендуется размещать равномерно на исследуемой местности на расстоянии 200–250 м друг от друга. Схема расположения контрольных точек на местности приведена на рисунке 2.3.

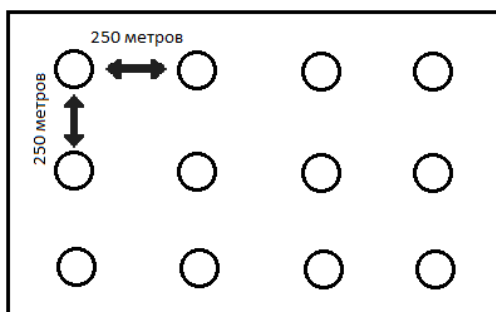


Рисунок 2.3 – Схема расположения контрольных точек на местности

Определение точных координат контрольных точек происходит с помощью спутникового оборудования в режиме RTK (Real Time Kinematic).

Для осуществления данных работ один из ГНСС-приемников (базовый неподвижный) необходимо разместить на открытом пространстве в точке с известной координатой рядом с местом, где планируются авиационные работы. Как правило, это пункты государственной геодезической сети (ГГС) (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Базовая станция на пункте ГГС

Базовая станция в режиме реального времени по каналу CSD передает данные на второй ГНСС-приемник, контроллер которого вычисляет координаты контрольных точек в нужной системе координат (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Определение точных координат контрольных точек

2.3 Создание полетного задания

При создании полетного задания для БПЛА следует учесть множество параметров, которые напрямую влияют на конечный результат (например, перекрытие аэрофотоснимков, высота полета, настройка камеры во время полета и т.д.). От этих параметров зависят точность и разрешение будущего ортофотоплана и цифровой модели местности.

Для создания полетного задания для беспилотных летательных аппаратов существует множество программ и сервисов. В таблице 2.1 приведен сравнительный анализ наиболее часто используемых программных сервисов.

Таблица 2.1 – Сравнительный анализ ПО для составления полетных заданий

Название программного обеспечения	Корректировка экспозиции в полете	Возможность задания угла наклона камеры	Продолжение миссии с последней точки
Drone Deploy	-	+	+
Pix4d	-	+	-
TeoFly	+	+	+
MapPilot	-	+	+

В данной работе для составления полетного задания использовался сервис TeoFly (рисунок 2.6). Этот сервис является наиболее гибким с точки зрения настроек полета, а также он отличается наиболее стабильной работой.



Рисунок 2.6 – Окно параметров полетного задания в ПО TeoFly

Основные параметры полетного задания, использованные в проведенном эксперименте, приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры полетного задания

Параметр	Значение
Перекрытие аэрофотоснимков, %	80/60
Высота полета, м	110
Скорость полета, м/с	9
Исследуемая площадь за один полет, га	45

2.4 Предварительная настройка БПЛА

Во время эксперимента использовался БПЛА DJI Phantom 4 PRO (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – БПЛА Phantom 4 Pro

В настоящее время данный аппарат занимает значительную долю рынка среди БПЛА вертолетного типа. Его отличительной способностью является сравнительно невысокая стоимость по сравнению с аналогами. Квадрокоптер оснащен камерой с пространственным разрешением 20 мегапикселей на гиростабилизирующем трехосевом подвесе. Основные характеристики БПЛА приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Основные характеристики БПЛА

Параметр	Значение
Максимальная скорость	20 м/с
Максимальная высота полета	500 м
Удаленность полета	5000 м
Система позиционирования	GPS, ГЛОНАСС
Разрешение матрицы камеры	20 Мп
Продолжительность полета	До 28 мин

Беспилотный летательный аппарат дополнительно оснащается высокоточной ГНСС-платой AGNSS L1/L2 (рисунок 2.8).

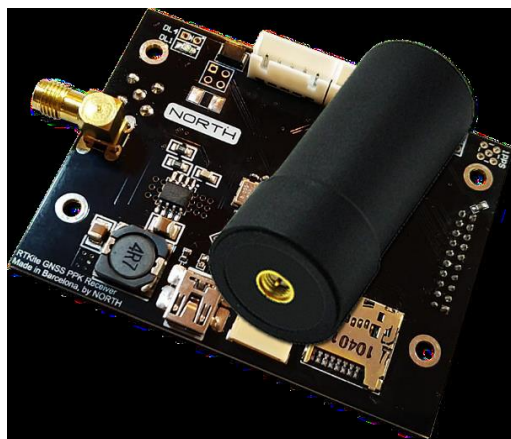


Рисунок 2.8 – ГНСС-плата AGNSS L1/L2

Указанная плата обеспечивает навигацию квадрокоптера и осуществляет запись данных со спутников в режиме кинематики. Она позволяет вычислить точные координаты центров фотографирования методом РПК (Post Processing Kinematic). Ее отличительной особенностью от конкурентов (например, от Emlid Reach M+) является наличие платы синхронизации. Основные характеристики платы синхронизации представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Основные характеристики ГНСС-платы AGNSS L1/L2

Параметр	Значение
Расстояние до базы	До 60 км
Время инициализации	До 30 с
Несущие частоты	L1 (1575,42 МГц), L2 (1227,6 МГц)
Частота записи спутниковых данных	5 Гц, 10 Гц

Плата синхронизации создает временную метку события при срабатывании механического затвора телевизионной камеры в середине времени экспозиции. Тем самым в постобработке данных спутниковых наблюдений можно получить высокоточные координаты центров фотографирования.

В качестве оборудования для координирования контрольных точек на местности использовался комплект спутникового геодезического оборудования от компании EFT. В качестве базовой станции использовался приемник EFT S1 (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Базовая станция EFT S1

В качестве подвижного ровера используется приемник EFT M2 (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 – Подвижный ровер EFT M2

Основные технические характеристики приемников представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Основные технические характеристики спутниковых геодезических приемников EFT M2 и EFT S1

Параметр	Значение
Поддерживаемые группировки спутников	GPS, ГЛОНАСС, Galileo, SBAS, Beidou, QZSS, IRNSS, L-Band
Точность измерений в режиме кинематики с постобработкой (PPK)	В плане: 8 мм + 1 мм/км По высоте: 15 мм + 1 мм/км
Точность измерений в режиме кинематики в реальном времени (RTK)	В плане: 8 мм + 1 мм/км По высоте: 15 мм + 1 мм/км
Частота записи данных	От 1 Гц до 50 Гц

Перед началом авиационных работ необходимо проверить общее состояние беспилотного летательного аппарата: отсутствие дефектов на корпусе БПЛА,

исправность двигателей, прочность пропеллеров, работу подвеса камеры, значения показаний компасов и инерциальной системы.

В качестве полетной программы используется ПО Litchi. Его главная отличительная особенность состоит в том, что во время полета есть возможность изменять параметры камеры и отслеживать все показатели датчиков БПЛА: скорость, высота полета, количество отслеживаемых спутников, онлайн-трансляция с камеры БПЛА, положение БПЛА на маршруте.

2.5 Авиационные работы

Перед взлетом БПЛА базовая станция, установленная на пункте государственной геодезической сети, переключается в режим статического наблюдения за спутниками с частотой от 10 с до 1/5 с.

В качестве точки взлета БПЛА выбирается открытая территория вдали от высоких зданий и деревьев. Когда квадрокоптер набирает достаточное количество спутников и определяет свое местоположение, производится взлет. Далее осуществляется набор рабочей высоты. На рабочей высоте, прежде чем отправить БПЛА на маршрут, производится настройка фокуса камеры. Камера опускается в надир, осуществляется ее фокусировка на местность, после чего фокус камеры блокируется и остается неизменным на протяжении всего маршрута (рисунок 2.11).

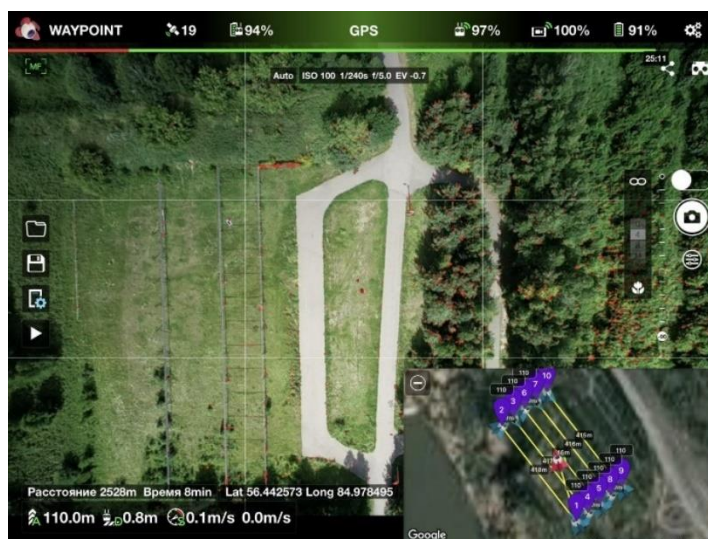


Рисунок 2.11 – Фокусировка камеры на рабочей высоте

После того как набрана рабочая высота и выполнена фокусировка камеры, БПЛА отправляется на первую стартовую точку.

Параллельно выполняется настройка экспозиции камеры (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 – Настройка параметров экспозиции телевизионной камеры БПЛА

В таблице 2.6 приведены основные настройки телевизионной камеры, применяемые для аэрофотосъемочных работ на БПЛА.

Таблица 2.6 – Основные настройки камеры

Параметр	Значение
Формат изображения	3:2
Режим работы камеры	A (Приоритет диафрагмы)
Баланс белого	Солнечно/Пасмурно
ISO	100–200
Диафрагма	2,8–8
Экспозиция	1/500–1/1600
Формат сжатия	JPEG
Механический затвор камеры	Включен

Рекомендуется использовать экспозицию от 1/500 с до 1/1600 с. При экспозиции 1/2000 с и меньше перестает работать механический затвор камеры, а метка события фотографирования создается неверно, поэтому в процессе полета необходимо постоянно отслеживать этот параметр и при необходимости изменять значение диафрагмы.

После завершения выполнения полетного задания и приземления выключается питание БПЛА, а затем питание базового приемника.

2.6 Полевой контроль полученного материала

На последнем этапе проведения авиационных работ проводится проверка корректности полученных материалов, в частности проверяется карта памяти БПЛА на предмет наличия аэрофотоснимков и визуально оценивается их качество.

Также проводится проверка данных спутниковых измерений по отношению сигнал/шум (ОСШ) (рисунок 2.13). Для этого с ГНСС-приемника БПЛА и с базовой станции архивируются RINEX-файлы по полевому компьютеру. Оптимальные значения ОСШ для успешной обработки данных должны находиться в пределах от 35 до 50 дБ.



Рисунок 2.13 – График уровня отношения сигнал/шум с ГНСС-приемника БПЛА

2.7 Апробация методики

Методика была использована при создании ортофотоплана местности садового некоммерческого товарищества (СНТ), располагающегося в Томском районе. Общая площадь съемки составила 40 га. На территории было равномерно распределено 6 контрольных точек. В результате проведения авиационных работ и обработки полученного материала максимальная плановая ошибка определения координат составила 7,59 см. Максимальное отклонение высотной отметки 7,33 см. Пространственное разрешение полученного ортофотоплана 2,28 см/пиксель.

Методика использовалась также при подсчете насыпи полезных ископаемых. Итоговый результат подсчета отличается от традиционного метода маркшейдерской съемки на 0,57%.

Предлагаемая методика проведения авиационных работ используется при выполнении договора № 651ГУЦЭС8-D3/63775 о предоставлении гранта на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив коммерческого использования результатов в рамках реализации инновационного проекта «Разработка технологии подеревной таксации леса по данным аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов» программы УМНИК. Грантополучателем и руководителем проекта является автор настоящей работы.

Методика использовалась при создании цифровой модели полигона для испытания активно-импульсных телевизионных измерительных систем, разрабатываемых на кафедре телевидения и управления ТУСУР.

2.8 Основные результаты раздела

Описанная методика проведения авиационных работ позволяет создавать ортофотопланы и цифровые модели местности, соответствующие масштабу 1:500.

Ошибка в определении географических координат объектов на ортофотоплане и цифровой модели местности составляет менее 10 см. Можно утверждать, что предложенная методика проведения авиационных работ с помощью БПЛА соответствует нормам и стандартам топографических планов масштаба 1:500 и может быть применима на практике при построении топографических планов реальных объектов.

3 Методика обработки результатов аэрофотосъемки

3.1 Описание методики

Результаты данного исследования опубликованы в [103, 104, 106]. Предварительно были проведены подготовительные и авиационные работы на территории одного из населенных пунктов Томской области. Работы проводились по методике, описанной в разделе 2. Для проведения камеральных работ с целью построения геопривязанного ортофотоплана местности были предоставлены полученные в результате авиационных работ аэрофотоснимки, данные спутниковых наблюдений с БПЛА и базовой станции, а также координаты контрольных точек в заданной системе координат.

Программно-аппаратный комплекс включал в себя программное обеспечение для обработки спутниковых измерений RTKLib. Для фотограмметрической обработки данных используется программное обеспечение Agisoft Metashape.

Технологическая схема основных этапов реализации обработки результатов аэрофотосъемки изображена на рисунке 3.1.

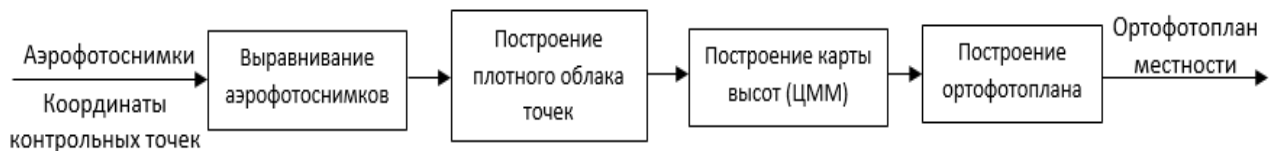


Рисунок 3.1 – Технологическая схема методики обработки результатов аэрофотосъемки

3.2 Выравнивание аэрофотоснимков

Первый этап сводится к аффинным преобразованиям соседних снимков. В результате сопоставления соседних снимков и поиска общих точек строится разреженное облако точек (рисунок 3.2).

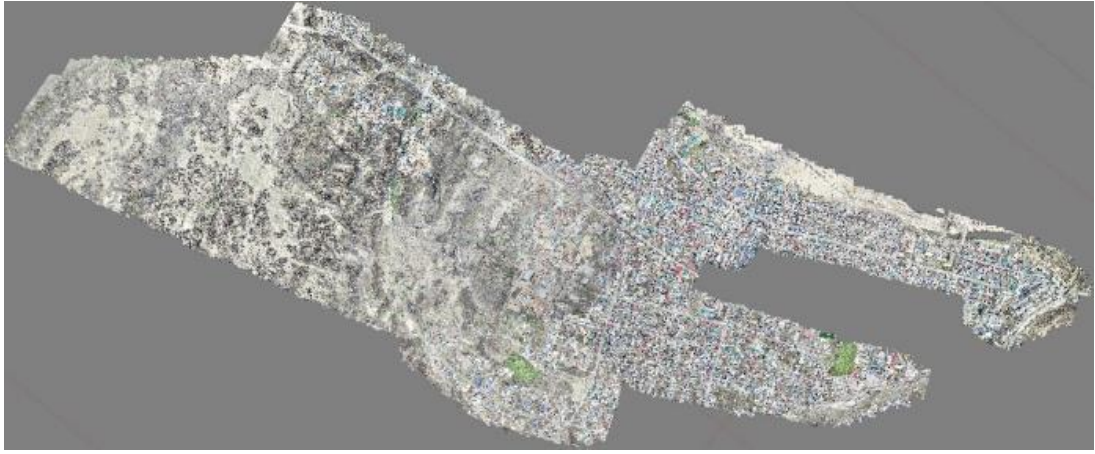


Рисунок 3.2 – Разреженное облако общих точек

В результате выравнивания и оптимизации центров фотографирования были получены следующие значения ошибок координат на контрольных точках (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Ошибка координат на контрольных точках

Количество контрольных точек	Ошибка X, см	Ошибка Y, см	Ошибка Z, см	Общая ошибка, см
63	2,39	2,56	4,31	5,55

Смоделирована ситуация, когда данные с геодезического приемника были искажены. Соответственно, часть изображений обрабатывалась без точных значений элементов внутреннего и внешнего ориентирования. Часть территории, на которой имитировался искаженный спутниковый сигнал, соответствовала одному вылету БПЛА и равнялась около 40 га. На рисунке 3.3 изображения в этой области отмечены красным цветом.

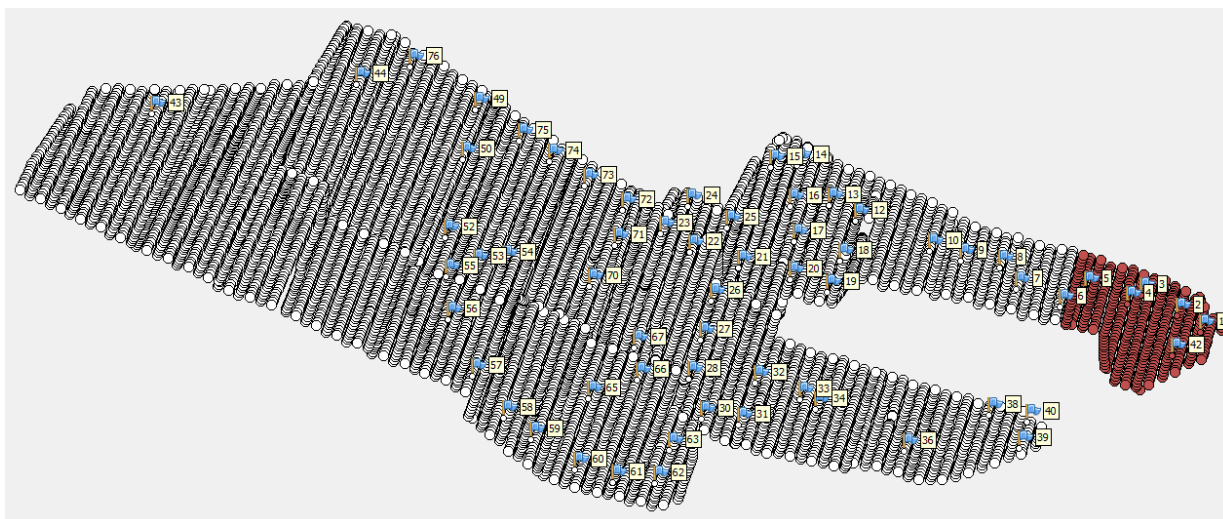


Рисунок 3.3 – Область имитации искаженного сигнала от спутников

В данной области обработка изображений происходила без точных центров фотографирования. Точность географической привязки оценивалась по 6 контрольным точкам, расположенным на этой местности. В таблице представлена ошибка определения координат на контрольных точках.

Таблица 3.2 – Ошибка координат в контрольных точках

Название контрольной точки	Ошибка координат в контрольных точках X, см	Ошибка координат в контрольных точках Y, см	Ошибка координат в контрольных точках Z, см
5	2,7	3,6	5,5
4	8,1	6,3	11,2
3	9,2	8,4	12,7
2	15,2	13,4	17,3
1	21,1	17,2	19,1
42	19,8	22,4	17,7

Из таблицы 3.2 видно, что в контрольных точках 5, 4, 3, расположенных рядом с областью, на которой обработка происходила по точным центрам, плановая ошибка географических координат не превышает 10 см. Данную особенность можно объяснить тем, что смежная область точно определена по точным центрам фотографирования, что дает возможность обеспечивать высокую точность координат недалеко расположенных изображений, на которых изображены одинаковые объекты. При увеличении расстояния от этой области ошибка координат начинает возрастать и на контрольных точках 2, 1, 42 становится

более 10 см. В таком случае данный участок ортофотоплана непригоден для практического применения.

Для компенсации ошибки координат на участке, имитирующем искаженный сигнал со спутника, была проведена обработка изображений по точным центрам фотографирования совместно с контрольными точками в качестве опорных в данной области. В качестве опорных были выбраны точки 5, 2, 42, а в качестве проверочных – 4, 3, 1.

Результаты оценки точности координат представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Точность координат после применения методики

Название контрольной точки	Ошибка координат в контрольной точке X, см	Ошибка координат в контрольной точке Y, см	Ошибка координат в контрольной точке Z, см
4	2,54	3,6	8,7
2	3,41	6,2	5,1
42	4,7	3,6	4,8

Из таблицы 3.3 видно, что ошибка координат в контрольных точках уменьшилась кратно. Это дает право утверждать, что обработка изображений по точным центрам фотографирования совместно с использованием контрольных точек в качестве опорных, где это необходимо, увеличивает точность построения ортофотоплана местности до ± 10 см.

Также смоделирована ситуация, когда ортофотоплан местности строится только по контрольным точкам в качестве опорных. Количество опорных точек выбиралось различным, от 0 до 60 штук. В таблице ниже представлен результат, отражающий зависимость точности координат в контрольных точках от количества опорных.

Таблица 3.4 – Зависимость ошибки координат в контрольных точках от количества используемых опорных точек

Количество опорных точек	Ошибка координат в контрольных точках X, см	Ошибка координат в контрольных точках Y, см	Ошибка координат в контрольных точках Z, см
60	1,02	1,13	2,73
40	4,13	8,04	7,99
20	14,11	10,21	32,07
10	27,58	34,2	41,78
5	45,17	38,83	50,9
1	90,22	114,04	68,32
0	90,23	114,07	69,01

На рисунке 3.4 приведен график зависимости ошибки каждой оси координат от количества использованных в обработке опорных точек.

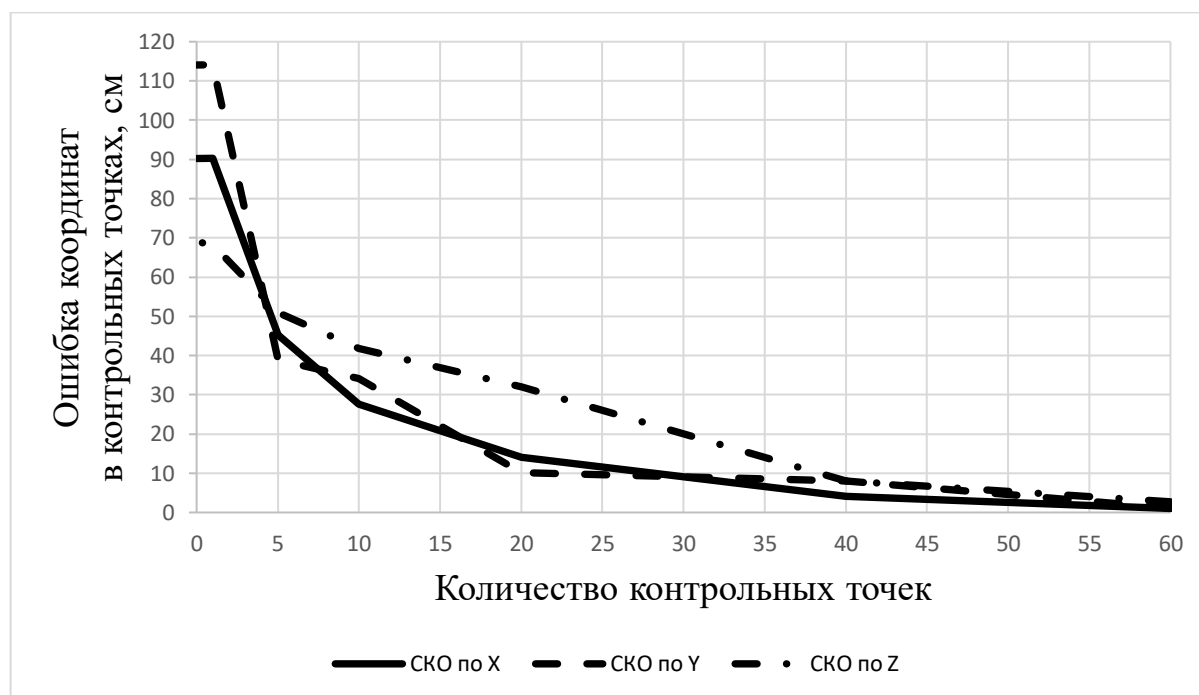


Рисунок 3.4 – Зависимость ошибки координат от количества контрольных точек

Из графика (рисунок 3.4) следует, что ошибка координат в контрольных точках в диапазоне использования опорных точек от 0 до 10 резко возрастает. И напротив, при большом количестве используемых опорных точек (от 50 до 60) ошибка координат в контрольных точках остается минимальным и не превышает 10 см.

3.3 Построение плотного облака точек

Фрагмент смоделированного плотного облака точек изображен на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Плотное облако точек

Плотное облако точек представляет собой подобие лазерного сканирования, но полученного путем фотограмметрической обработки. В качестве практического применения в нем можно измерять размеры объемных объектов.

3.4 Построение карты высот

Карта высот строится на основании плотного облака точек и представляет собой регулярную сетку значений высот (рисунок 3.6).

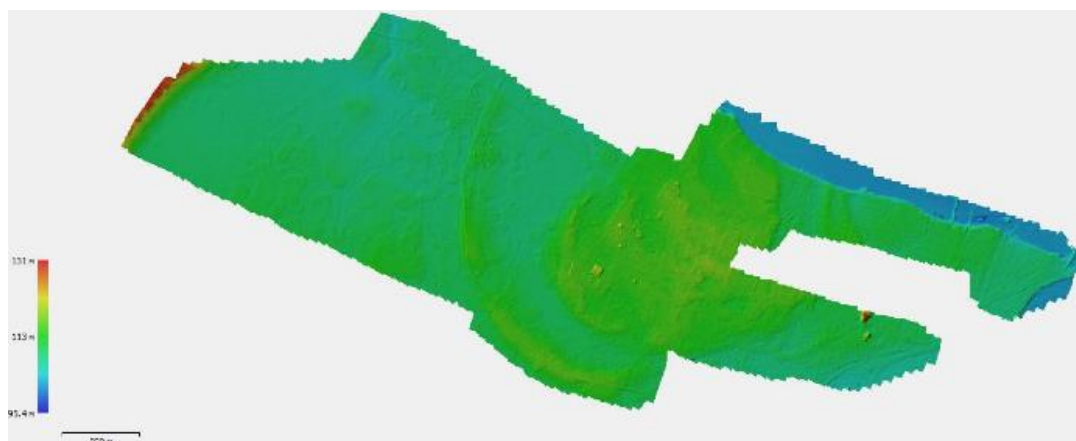


Рисунок 3.6 – Карта высот

В данном эксперименте по карте высот можно определить высотную отметку Z любого объекта исследуемой местности со средней точностью 4,3 см.

3.5 Построение ортофотоплана

Ортофотоплан местности (рисунок 3.7) был построен по точным центрам фотографирования совместно с контрольными точками в качестве опорных в области имитации искаженного спутникового сигнала. Итоговая средняя точность в плане составила 2,42 см, при пространственном разрешении 2,85 см на один пиксель изображения.



Рисунок 3.7 – Итоговый ортофотоплан местности

3.6 Апробация метода обработки

Работы проводились на территории кадастровых кварталов общей площадью 880 га.

Фотограмметрическая обработка производилась по точным центрам фотографирования совместно с контрольными точками в качестве опорных в тех областях полета, где данные с геодезического приемника БПЛА подвергались сильным искажениям (средняя точность ортофотоплана в этих областях составила 15,5 см). В результате построения ортофотоплана по точным центрам фотографирования совместно с контрольными точками удалось увеличить географическую точность до 8 см [106].

Итоговая точность определения координат и высотной отметки на всей модели составила 5,5 см.

3.7 Основные результаты раздела

В случае когда геодезический приемник на борту БПЛА подвергается сильной электромагнитной помехе, то традиционный способ построения ортофотоплана по точным центрам фотографирования даст точность географической привязки более ± 10 см. Разработанная методика обработки аэрофотоснимков с БПЛА по точным центрам фотографирования совместно с контрольными точками позволяет увеличить точность ортофотоплана, соответствующую масштабу 1:500, т.е. ошибка определения координат составляет менее 10 см.

Методика использовалась при создании цифровой модели полигона для испытания активно-импульсных телевизионных измерительных систем, разрабатываемых на кафедре телевидения и управления ТУСУР, а также при проведении комплексных кадастровых работ.

4 Предварительная обработка изображений для повышения точности построения ортофотопланов местности

4.1 Проведение эксперимента

Для оценки работы традиционных методов устранения смаза на изображениях, вызванного движением камеры при недостаточно короткой экспозиции, был выбран участок местности, содержащий дорожную разметку на асфальте. Дорожная разметка состоит из прямых линий и углов, а также обладает высоким контрастом по отношению к фону (асфальту). Исходя из этого ее можно использовать в качестве фрагмента интереса на исследуемых изображениях. На рисунке 4.1 ниже приведено изображение полигона со спутникового снимка.

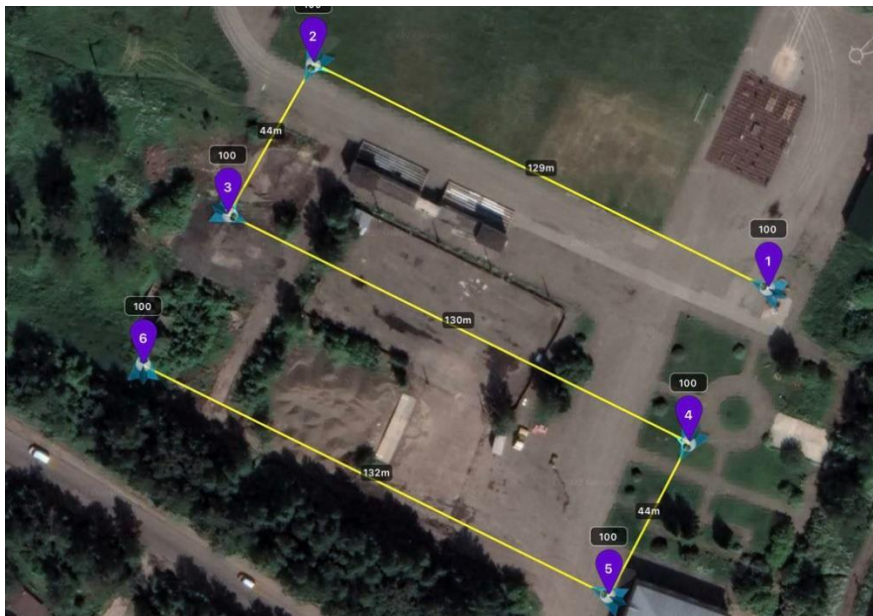


Рисунок 4.1 – Полигон для исследования

Желтой линией показана траектория, по которой осуществляет полет БПЛА во время выполнения полетного задания. В общей сложности по данному маршруту было выполнено 13 полетных заданий, в которых скорость, высота полета и перекрытие были неизменными, а изменялось лишь время экспонирования матрицы (экспозиция). В таблице 4.1 ниже приведены основные параметры полетного задания.

Таблица 4.1 – Основные параметры полетного задания

Параметр	Значение параметра
Высота полета, м	100
Скорость полета, м/с	9
Продольное перекрытие изображений	80%
Поперечное перекрытие изображений	70%
Экспозиция, с	1/640, 1/400, 1/320, 1/240, 1/160, 1/100, 1/80, 1/60, 1/50, 1/25, 1/10, 1/5, 1/2

В результате выполнения полетных заданий было получено 13 видеорядов исследуемой местности с разным временем экспозиции. Вычисление точных координат центров фотографирования и построение ортофотопланов местности выполнялось по методике, описанной в разделе 3.

Для оценки точности географической привязки ортофотопланов местности были получены точные географические координаты контрольных точек на местности в количестве восьми (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Расположение контрольных точек

Координаты контрольных точек были получены с помощью двухчастотного геодезического приемника, имеющего действующую метрологическую поверку в режиме RTK. Базовая станция располагалась в точке с известной координатой на удалении 5,9 км от места проведения эксперимента.

В результате камеральной обработки материалов аэрофотосъемки было получено 13 геопривязанных ортофотопланов местности. Была оценена ошибка в

контрольных точках на ортофотоплане относительно значений, полученных при инструментальном измерении. Результаты приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Ошибка координат в контрольных точках

Значение экспозиции, с	Ошибка X, см	Ошибка Y, см	Ошибка Z, см	Ошибка XY, см
1/640	1,9	5,1	3,5	5,3
1/400	2,7	5,2	5,7	5,8
1/320	2,2	6,2	2,69	6,65
1/240	1,7	6,2	4,2	6,5
1/160	2	6,6	2,74	6,9
1/80	3,5	5,8	3,8	7,8
1/60	4,6	7,7	3,65	9,03
1/50	5,3	5,8	3,8	7,8
1/25	9,9	7,4	2,42	12,38
1/10	17,6	12,5	11,4	25,1
1/5	49	23	16,14	54,63
1/2	115	57	26,3	129,2

Из таблицы 4.2 видно, что с увеличением экспозиции, начиная со значения 1/25 с, ошибка координат на контрольных точках резко увеличивается и в плане превышает 10 см, что является критическим значением при выполнении ряда практических задач, где ошибка координат не должна превышать 10 см. При этом также ухудшается визуальное восприятие информации, отображенной на изображениях.

На рисунке 4.3 ниже приведено полученное изображение и показан пример объекта интереса. Изображение получено при экспозиции, равной 1/640 с. В качестве точек интереса выбрана дорожная разметка, так как она имеет подходящую форму и повышенный контраст относительно фона, что необходимо для проведения исследования. В дальнейшем, для удобства восприятия информации результаты будут приводиться лишь в объекте интереса.



Рисунок 4.3 – Исходное несмазанное изображение

При визуальном анализе точки интереса видно, что изображение дорожной разметки четкое и имеет ярко выраженные границы. Такое изображение в данной работе считается несмазанным.

Главной целью данного исследования является увеличение точности географической привязки ортофотоплана местности, полученного по изображениям со смазом. Поэтому в дальнейшем в рамках этого раздела будут рассматриваться изображения и ортофотопланы местности, ошибка координат на контрольных точках которых более 10 см, т.е. изображения с параметром экспозиции $1/25$ с и более. Обработка смазанных изображений выполнялась в среде MATLAB.

На рисунке 4.4 приведены объекты интереса на изображении при различной экспозиции.

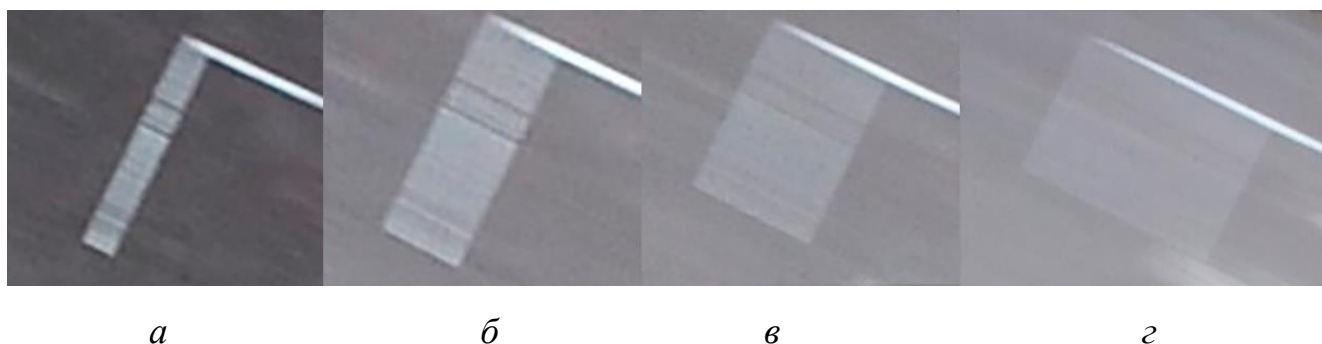


Рисунок 4.4 – Объекты интереса при различных параметрах экспозиции.

$$a - 1/25с, б - 1/10с, в - 1/5с, з - 1/2с$$

Из рисунка 4.4 видно, что в результате смаза изображения нарушается не только географическая привязка раstra (исходя из таблицы 4.2), но и ухудшается визуальное восприятие сцены, что делает процесс дешифровки объектов гораздо сложнее.

4.2 Моделирование и оценка функции рассеяния точки

Как было описано в разделе 1 для устранения смаза на изображении необходимо знать функцию рассеяния точки (ФРТ). Практически любой беспилотный летательный аппарат имеет на своем борту инерциальную систему и осуществляет полет по заранее заданному маршруту. Его движение, как правило, прямолинейное и равномерное. В результате становится известной некоторая априорная информация о характере смаза, которую можно использовать при определении ФРТ.

Исходя из этого, ФРТ должна представлять собой линию, которая является «следом» от точки. Размер этой линии равен расстоянию, которое пролетает БПЛА за время экспонирования кадра, т.е. за время экспозиции, выраженной в пикселях. В таблице 4.3 представлены необходимые априорные данные о полете и параметрах сенсора камеры и экспозиции, необходимые для вычисления размера и направления ФРТ.

Таблица 4.3 – Основные параметры полета и камеры, используемой в эксперименте

Параметр	Значение
Высота полета, м	100

Продолжение таблицы 4.3

Скорость полета, м/с	9
Размер кадра, пиксели	3648x5472x3
Фокусное расстояние, мм	8,8 мм / 24 мм (эквивалент 35 мм)
Физический размер матрицы, мм	13,2x8,8
Угол обзора, мм	84°

Исходя из параметров, приведенных в таблице 4.3, физический размер одного пикселя матрицы равен:

$$n = (x/a) \cdot 1000, \quad (4.1)$$

где n – размер пикселя в микрометрах;

x – линейный размер матрицы в мм по одной из сторон;

a – количество пикселей по соответствующей стороне;

$$n = (13,2/5472) \cdot 1000 = 2.412 \text{ мкм.}$$

Размер пикселя на местности равен:

$$GSD = (S_w \cdot H \cdot 100)/(F_r \cdot mW), \quad (4.2)$$

где GSD – размер пикселя на местности;

S_w – ширина сенсора камеры, мм;

F_r – фокусное расстояние, мм;

H – высота съемки, м;

mW – ширина кадра съемки, пиксели.

При высоте полета 100 м GSD равен 2,7 см. Один пиксель на изображении соответствует 2,7 см на местности. Можно подсчитать расстояния, которые пролетал БПЛА во время экспонирования матрицы, используя выражение:

$$S = v \cdot t, \quad (4.3)$$

где S – расстояние, пройденное БПЛА за время экспонирования матрицы, м;

v – скорость полета БПЛА, м/с;

t – время экспозиции, с.

Тогда, расстояние пройденное БПЛА в пикселях равно:

$$S_p = \frac{S}{GSD}, \quad (4.4)$$

где S_p – расстояние, пройденное БПЛА за время экспонирования матрицы, пиксели.

Используя выражение 4.3 и 4.4, вычисляется расстояние пройденное БПЛА за время экспозиции, которое характеризует размер смаза на изображении, а значит и ФТР. Результаты расчетов представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расстояние, пройденное БПЛА за время экспонирования матрицы

Время экспонирования, с	Размер смаза, см	Размер смаза, пиксели
1/640	1,12	0,41
1/400	2,25	0,83
1/320	2,78	1,02
1/240	3,69	1,36
1/160	5,62	2,08
1/100	9	3,33
1/80	11,25	4,16
1/60	14,4	5,33
1/50	18	6,66
1/25	36	13,33
1/10	90	33,33
1/5	180	66,67
1/2	450	166,67

Если анализировать таблицы 4.3 и 4.4, можно сделать вывод, что существенная величина смаза (36 см) начинается с времени экспозиции 1/25 с и более.

Учитывая направление движения БПЛА, ФРТ можно представить в виде вектора, расположенного вертикально. Пример такой матрицы для экспозиции 1/25 с представлен на рисунке 4.5.

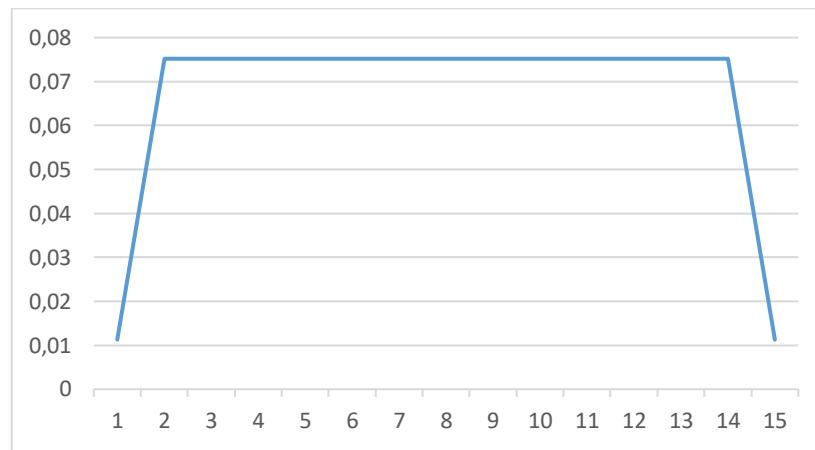


Рисунок 4.5 – Пример ФРТ для экспозиции 1/25 с

Как можно наблюдать на рисунке 4.5, количество элементов матрицы равно 15, в то время как за время экспонирования кадра БПЛА перемещается лишь на 13 пикселей. Наличие двух крайних элементов обусловлено тем, что в них учтена энергия в 0,3 пикселя (исходя из таблицы 4.4). Таким образом, ФРТ формируется более точно.

4.3 Моделирование и устранение смаза на искусственно искаженных изображениях

Используя полученную ФРТ, были искусственно искажены несмазанные изображения исследуемого полигона и по полученным изображениям построен ортофотоплан местности. Заданная ФРТ соответствует ФРТ при экспозиции 1/25 с. На рисунке 4.6 приведен объект интереса на полученном ортофотоплане местности.



Рисунок 4.6 – Объект интереса с искусственным смазом,
соответствующим экспозиции в $1/25$ с

На рисунке 4.7 приведен профиль яркости объекта интереса по неискаженному и искусственно искаженному изображению.

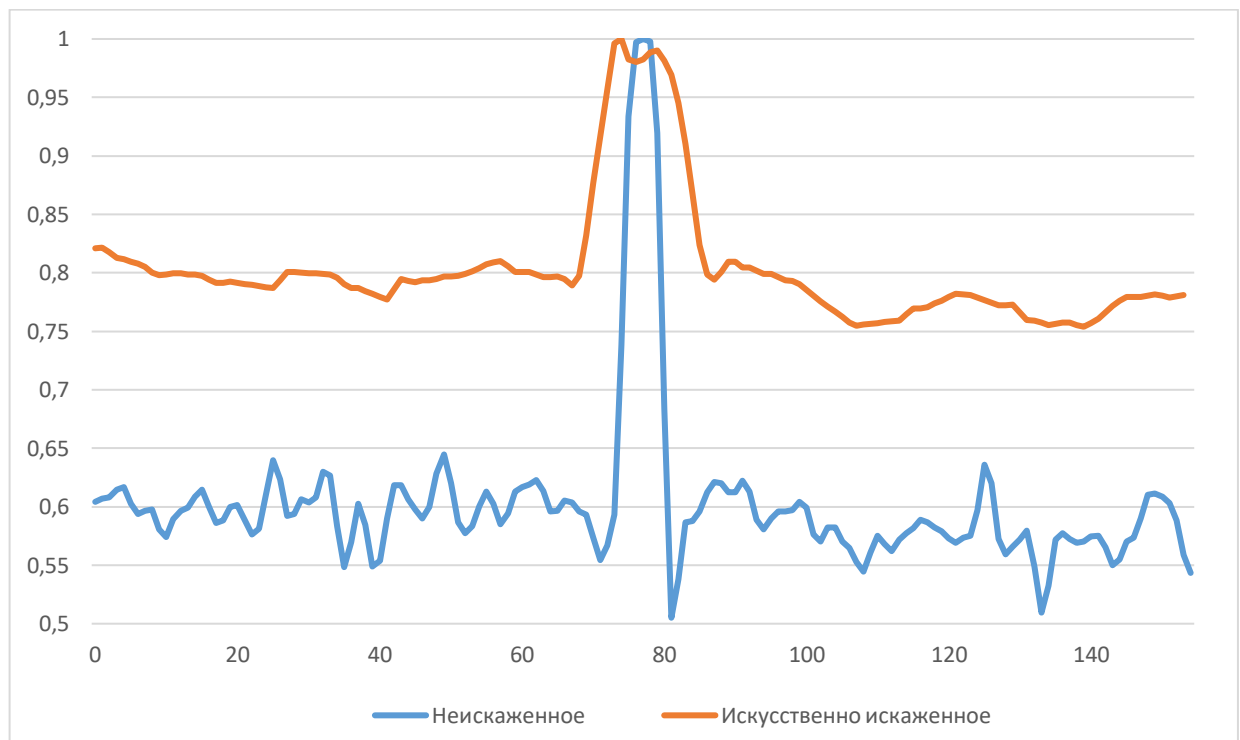


Рисунок 4.7 – Профиль яркости объекта интереса относительно яркости фона на неискаженном и искусственно искаженном изображениях

Ниже представлена таблица 4.5 со сравнительными характеристиками двух профилей.

Таблица 4.5 – Сравнительная характеристика профилей неискаженного и искаженного изображений

Характеристика	Неискаженное	Искусственно искаженное
Ошибка координат в контрольных точках, см	5,3	10,4
Контраст яркости объекта интереса и СКО яркости фона	11,2	4,78
Размер смаза, см	1,12	36
Размер смаза, пиксели	0,41	13,3

Общая ошибка координат в плане на контрольных точках составила 10,4 см, что сопоставимо с ошибкой координат в контрольных точках, полученных на реальных изображениях при выдержке 1/25 с.

Для устранения смаза на искусственно искаженных изображениях и уменьшения ошибки координат в контрольных точках каждое исходное изображение обрабатывается известными классическими методами устранения смаза на изображении.

4.3.1 Винеровская фильтрация

Винеровский фильтр [91] характеризуется тем, что при восстановлении изображения сглаживается. Алгоритм винеровской фильтрации представлен на рисунке 4.8.

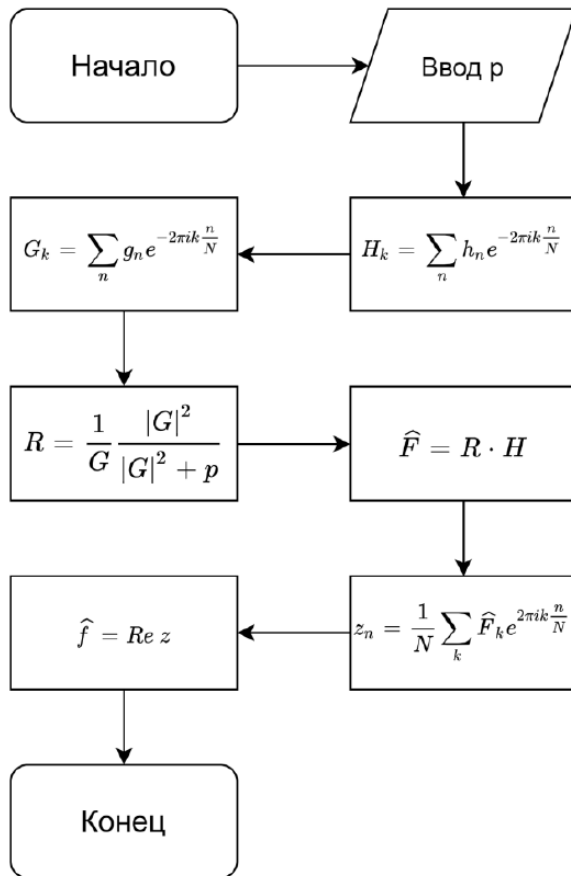


Рисунок 4.8 – Алгоритм фильтрации Винера

На рисунке 4.9 приведен объект интереса на ортофотоplane местности, построенном по изображениям, восстановленным фильтром Винера.



Рисунок 4.9 – Результат восстановления фильтром Винера

На рисунке 4.10 представлен профиль яркости объекта интереса относительно яркости фона искусственно искаженного изображения и восстановленного фильтром Винера.

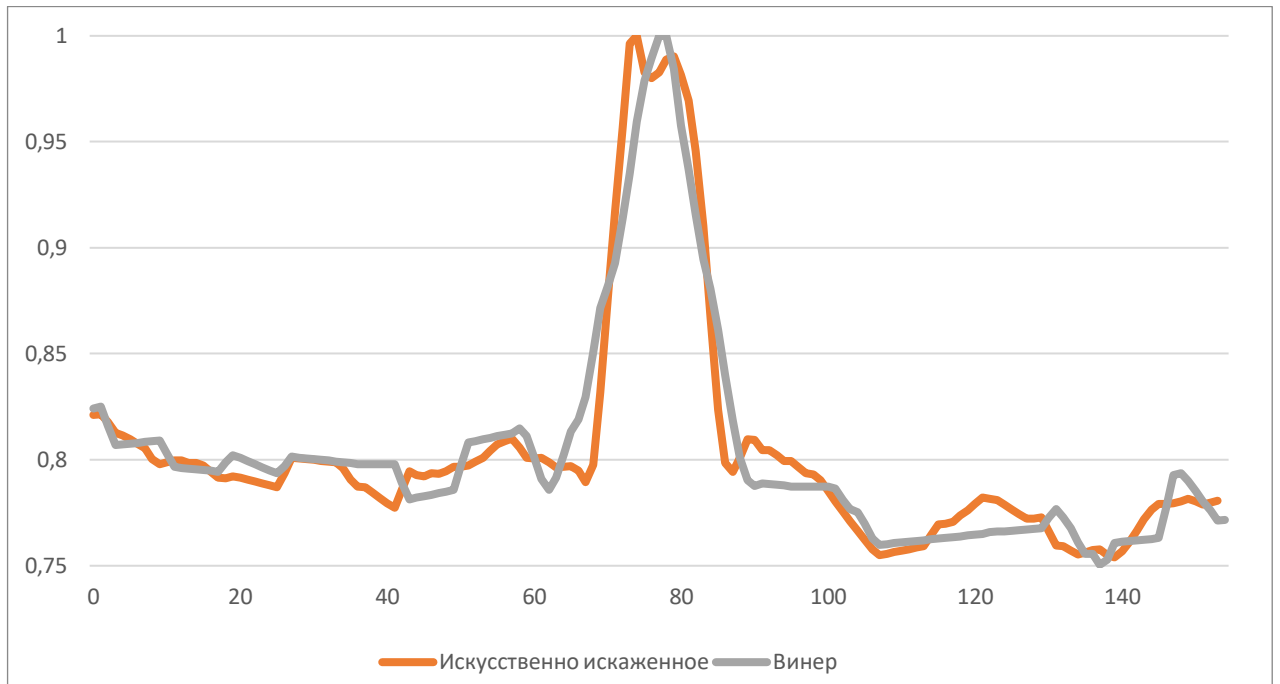


Рисунок 4.10 – Профиль яркости объекта интереса после винеровской фильтрации

Из графика видно, что пик стал более острым, а фон и линия более сглаженными.

Ниже представлена таблица 4.6 со сравнительными характеристиками двух профилей.

Таблица 4.6 – Сравнительная характеристика профиля искусственно искаженного изображения и восстановленного по методу Винера

Характеристика	Искусственно искаженное	Винеровская фильтрация
Ошибка координат в контрольных точках, см	10,4	5,2
Контраст яркости объекта интереса и СКО яркости фона	11,2	6,37
СКО яркости фона	3,19	1,7

Из таблицы 4.6 видно, что восстановление смазанных изображений по Винеру с использованием априорной информации о ФРТ уменьшает ошибку координат на контрольных точках в 2 раза.

4.3.2 Восстановление по Люси – Ричардсону

Фильтр Люси – Ричардсона является итеративным [95]. По этой причине следует выяснить не только априорную информацию о ФРТ, но и об оптимальном количестве итераций. Алгоритм одной итерации представлен на рисунке 4.11.

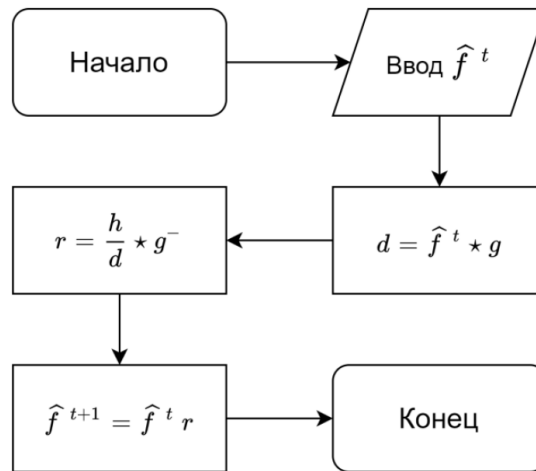


Рисунок 4.11 – Алгоритм одной итерации метода Люси – Ричардсона

В ходе моделирования были восстановлены одиночные изображения, в которых использовалось разное количество итераций (от 1 до 44). В результате анализа полученных изображений выяснилось, что оптимальным количеством итераций для фильтра Люси – Ричардсона является значение 20. Если применять большее количество итераций смаз на изображении остается неизменным, вместо этого начинают преобладать артефакты на изображении.

На рисунке 4.12 приведен объект интереса на ортофотоплане местности, построенного по изображениям, восстановленным фильтром Люси – Ричардсона с априорной информацией о ФРТ при 20 итерациях.



Рисунок 4.12 – Результат восстановления фильтром Люси – Ричардсона

На рисунке 4.13 представлен профиль яркости объекта интереса относительно яркости фона искусственно искаженного изображения и изображения, восстановленного фильтром Люси – Ричардсона.



Рисунок 4.13 – Профиль яркости объекта интереса после фильтрации Люси – Ричардсона

Из рисунка 4.13 видно, что контраст яркости объекта интереса и яркости фона заметно увеличился. Наряду с этим отчетливо наблюдается значительное увеличение артефактов на изображении.

Ниже представлена таблица 4.7 со сравнительными характеристиками двух профилей.

Таблица 4.7 – Сравнительная характеристика профиля искусственно искаженного изображения и изображения, восстановленного по методу Люси – Ричардсона

Характеристика	Искусственно искаженное	Фильтрация Люси – Ричардсона
Ошибка координат в контрольных точках, см	10,4	5,9
Контраст яркости объекта интереса и СКО яркости фона	11,2	10,27
СКО яркости фона	3,19	5,77

Восстановление изображения фильтром Люси – Ричардсона уменьшило ошибку координат на контрольных точках в 1,76 раз.

4.3.3 Фильтрация по Тихонову

Схема алгоритма регуляризации по Тихонову приведен на рисунке 4.14

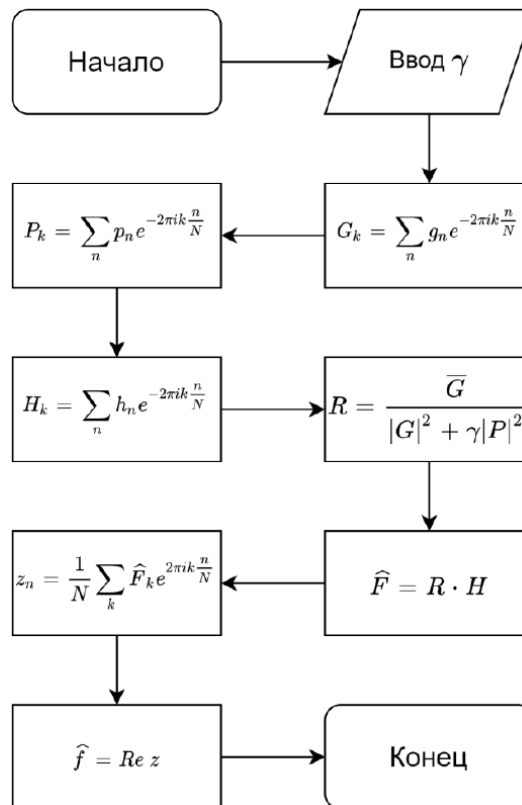


Рисунок 4.14 – Алгоритм регуляризации по Тихонову

Фильтрация по Тихонову [97] характеризуется резким увеличением артефактов на изображении. На рисунке 4.15 приведен объект интереса на

ортофотоplane местности, построенного по изображениям, восстановленным фильтром Тихонова с априорной информацией о ФРТ.

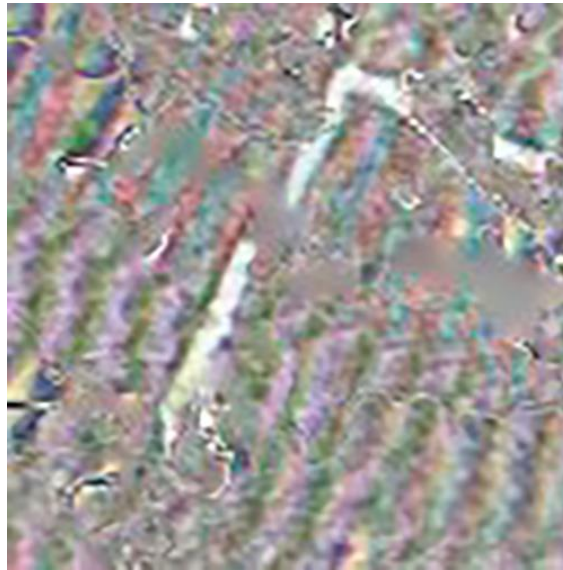


Рисунок 4.15 – Результат восстановления фильтром Тихонова

Из рисунка 4.15 видно, что артефакты на изображении достигают критических значений, что делает процесс дешифровки точек интереса затруднительным.

На рисунке 4.16 представлен профиль яркости объекта интереса относительно яркости фона искусственно искаженного изображения и изображения, восстановленного фильтром Тихонова.



Рисунок 4.16 – Профиль яркости объекта интереса после фильтрации по методу Тихонова

Ниже представлена таблица 4.8 со сравнительными характеристиками двух профилей.

Таблица 4.8 – Сравнительная характеристика профиля объекта интереса искусственно искаженного изображения и изображения, восстановленного по методу Тихонова

Характеристика	Искусственно искаженное	Фильтрация по Тихонову
Ошибка координат в контрольных точках, см	10,4	5,7
Контраст яркости объекта интереса и СКО яркости фона	11,2	3,53
СКО яркости фона	3,19	23,8

Применение фильтрации Тихонова для каждого смазанного изображения видеоряда привело к уменьшению ошибки координат на контрольных точках в 1,83 раза. Однако СКО яркости фона достигло 23,8, что отражает большое количество артефактов на восстановленном изображении.

4.3.4 Слепая деконволюция

Метод слепой деконволюции, как и метод Люси – Ричардсона, является итеративным, поэтому сначала нужно подобрать оптимальное количество итераций. После восстановления одиночного изображения по известной ФРТ с количеством итераций от 1 до 14 выяснилось, что наиболее оптимальный результат получается при количестве итераций, равном 6. На рисунке 4.17 приведен объект интереса на ортофотоплане местности, построенном по изображениям, восстановленным методом слепой деконволюции с априорной информацией о ФРТ и количеством итераций равным 6.



Рисунок 4.17 – Результат восстановления методом слепой деконволюции

Результат восстановления по методу слепой деконволюции похож на результат по винеровской фильтрации. Но в отличие от него объекты интереса имеют более выраженный контраст с по отношению к фону.

На рисунке 4.18 представлен профиль яркости объекта интереса относительно яркости фона искусственно искаженного изображения и изображения, восстановленного методом слепой деконволюции.

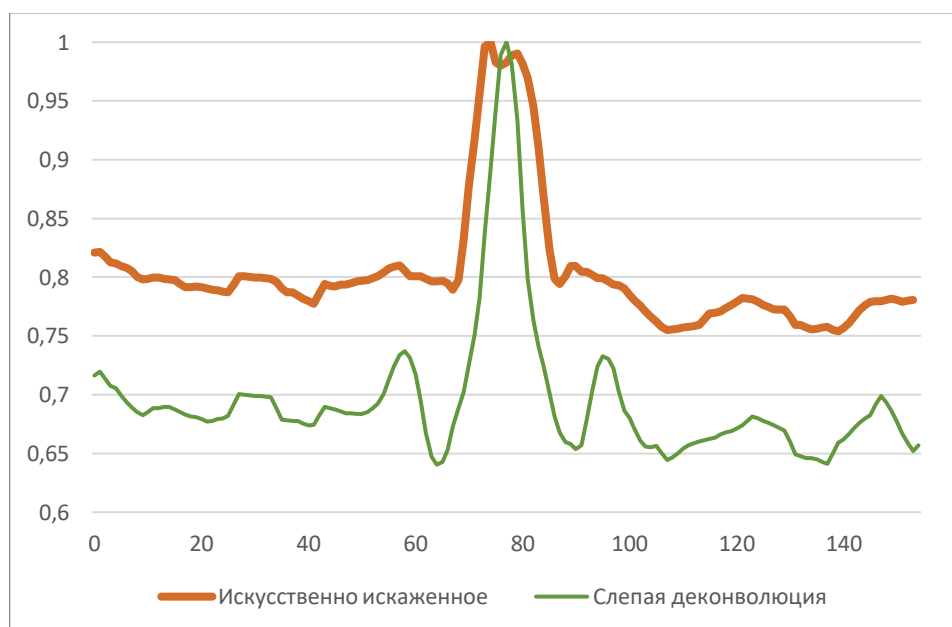


Рисунок 4.18 – Профиль яркости объекта интереса после фильтрации по методу слепой деконволюции

Ниже представлена таблица 4.9 со сравнительными характеристиками двух профилей.

Таблица 4.9 – Сравнительная характеристика профиля искусственно искаженного изображения и изображения, восстановленного по методу слепой деконволюции

Характеристика	Искусственно искаженное	Фильтрация по методу слепой деконволюции
Ошибка координат в контрольных точках, см	10,4	4,6
Контраст яркости объекта интереса и СКО яркости фона	11,2	10,33
СКО яркости фона	3,19	4,7

Применение метода слепой деконволюции для каждого смазанного изображения видеоряда привело к уменьшению ошибки координат на контрольных точках в 2,26 раза. СКО яркости фона достигло 4,7, что говорит о низком уровне артефактов на изображении. По своим характеристикам результат получился близким к фильтрации Винера.

На рисунке 4.19 приведена сводная диаграмма, отражающая основные количественные показатели полученных ортофотопланов местности по изображениям, восстановленным различными методами.

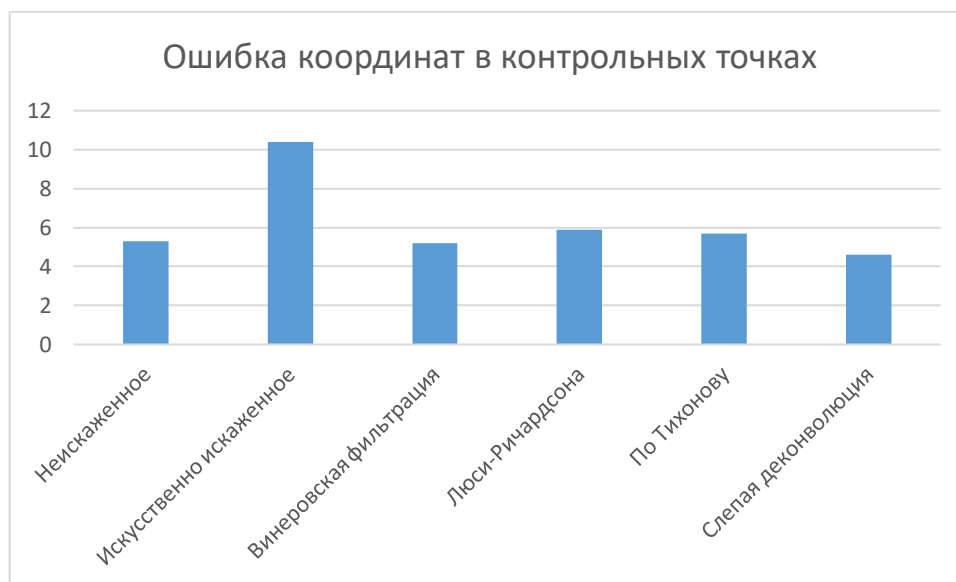


Рисунок 4.19 – Ошибка координат в контрольных точках

Из данных, представленных на рисунке 4.19, видно, что наибольшее приближение к ошибка координат в контрольных точках неискаженного смазанного ортофотоплана местности (5,3 см) имеют ортофотопланы, построенные по

изображениям, восстановленным методом винеровской фильтрацией (5,2 см) и методом слепой деконволюции (4,6 см).

На рисунке 4.20 показан контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона.



Рисунок 4.20 – Контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона

Из рисунка 4.20 видно, что наибольший контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона наблюдается у изображений, восстановленных по методу Люси – Ричардсона (10,27) и слепой деконволюции (10,33). Это указывает на то, что между объектом интереса и фоном наблюдается высокий контраст.

На рисунке 4.21 представлено СКО яркости фона.



Рисунок 4.21 – СКО яркости фона

Из рисунка 4.21 видно, что СКО яркости фона на обработанных изображениях на объектах интереса распределены примерно на одном уровне. Из общей картины резко отличается СКО яркости фона после обработки фильтром Тихонова (23,8). Этот показатель указывает на наличие больших искажений на изображениях, вызванных особенностью данной фильтрации. Наименьшее значение (1,7) принадлежит изображениям, восстановленным фильтром Винера. Данный показатель объясняется сглаживающими свойствами фильтра.

4.4 Обработка реальных изображений со смазом

Для обработки реальных изображений со смазом выбраны изображения, полученные при значении экспозиции $1/25$ с. Такой выбор обусловлен тем, что в разделе 4.3 использовались искусственно искаженные изображения с ФРТ, которая соответствует смазу $1/25$ с. Соответственно, сравнение полученных результатов будет более наглядным.

На рисунке 4.22 представлен объект интереса из ортофотоплана местности, построенного по реальным изображениям со смазом.



Рисунок 4.22 – Объект интереса на ортофотоplane местности
по реальным снимкам

Как и в разделе 4.3, каждое исходное изображение восстанавливалось четырьмя различными методами. На рисунке 4.23 представлены объекты интереса из ортофотопланов местности, построенных по изображениям, восстановленным различными методами.

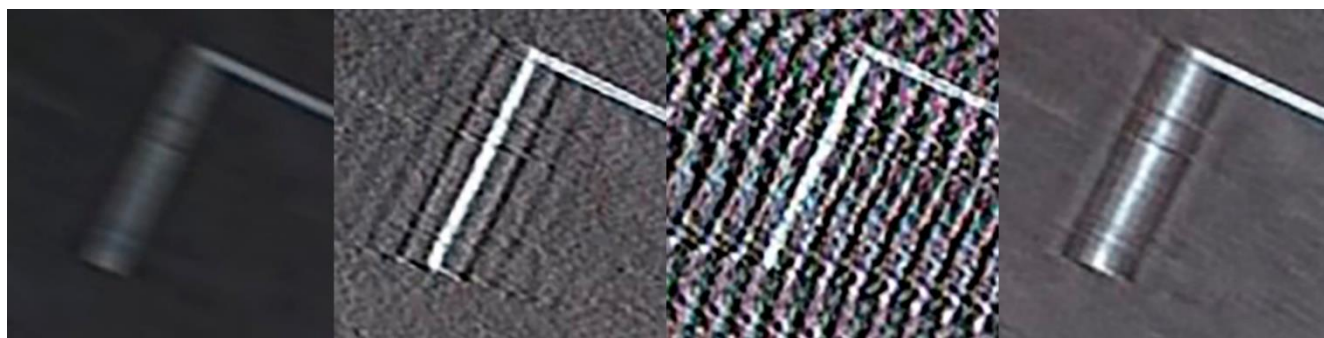
*a**б**в**г*

Рисунок 4.23 – Объект интереса на восстановленных ортофотопланах местности.

a – винеровская фильтрация, *б* – фильтрация Люси – Ричардсона,

в – фильтрация Тихонова, *г* – слепая деконволюция

В таблице 4.10 представлены сравнительные характеристики полученных ортофотопланов местности и объектов интереса.

Таблица 4.10 – Сравнительная характеристика профиля реальных изображений и восстановленных различными методами

Характеристика	Реальные изображения	Винер	Люси – Ричардсон	Тихонов	Слепая деконволюция
Ошибка координат в контрольных точках, см	12,38	7,18	5,11	9,1	5,99
Контраст яркости объекта интереса и СКО яркости фона	10,51	13,8	4,5	1,44	21,1
СКО яркости фона	2,78	1,76	19,78	66,32	5,58

Далее на рисунках приведена сравнительная диаграмма, отражающая разницу между основными количественными показателями полученных ортофотопланов местности по восстановленным изображениям и исходным смазанным.

На рисунке 4.24 представлена ошибка координат в контрольных точках при разных алгоритмах фильтрации.



Рисунок 4.24 – Ошибка координат на контрольных точках

Из рисунка 4.24 видно, что наименьшая ошибка координат в контрольных точках наблюдается при фильтрации алгоритмом Люси –Ричардсона и равняется 5,11 см, вместо 12,38 см на исходном изображении.

На рисунке 4.25 представлена диаграмма, отражающая контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО фона.



Рисунок 4.25 – Контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона

Из рисунка 4.25 видно, что наибольший контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона наблюдается при фильтрации методом слепой деконволюции и равно 21,1 вместо 10,51 у исходного.

На рисунке 4.26 приведена СКО яркости фона в зависимости от применяемой фильтрации.



Рисунок 4.26 – СКО яркости фона

Из рисунка 4.26 видно, что наибольшее СКО яркости фона достигается при фильтрации по методу Тихонова, что говорит о наличии ярко выраженных артефактов на восстановленных изображениях.

4.5 Основные результаты раздела

В главе 4 описан эксперимент, направленный на увеличение точности построения ортофотоплана местности по изображениям, полученным с БПЛА.

1. Было выполнено 13 полетных заданий на высоте 100 м над исследуемой территорией и произведена аэрофотосъемка местности с различным временем экспозиции: от $1/640$ с до $1/2$ с. Ошибка координат в контрольных точках не превышают 10 см до того момента, пока значение экспозиции не станет больше либо равно $1/25$ с. Максимальная ошибка определения координат наблюдается при значении экспозиции $1/2$ с и достигает 129,2 см в плане.

2. Исходя из априорной информации о полете и параметрах фотографирования (скорость полета, высота полета, разрешение одного пикселя на местности, параметры экспозиции, курс полета) была вычислена ФРТ, позволяющая восстанавливать смазанные изображения, полученные в результате недостаточно короткой экспозиции в силу неблагоприятных условий съемки. Была вычислена ФРТ, максимально приближенная к смазу, который возникает на изображениях при прямолинейном равномерном движении БПЛА на скорости 9 м/с на высоте 100 м и значении экспозиции $1/25$ с.

3. Изображения, не имеющие смаза, были искусственно искажены полученной ФРТ и восстановлены 4 различными способами (фильтрация Винера, итерационная фильтрация Люси – Ричардсона, регуляризация по Тихонову и по методу слепой деконволюции). По итогам моделирования выяснилось, что наибольший эффект по уменьшению ошибки координат в контрольных точках оказали винеровская фильтрация (в 2 раза) и фильтрация методом слепой деконволюции (в 2,26 раз). Также выяснилось, что фильтрация по методу Тихонова оказывает негативное влияние на шумы в восстановленных изображениях, т.е. появляются артефакты обработки изображений. СКО яркости фона достигает 66,32, вместо 2,78 у исходного изображения. Данный эффект делает процесс

дешифровки сцены на изображении практически невозможным. Фильтр Винера оказывает сглаживающий эффект на изображение. При этом СКО яркости фона достигает минимальных значений среди всех методов и равно 1,76.

4. В результате восстановления реальных изображений, значение экспозиции которых при съемке территории было равно $1/25$ с, выяснилось, что ошибка координат в контрольных точках максимально уменьшилась при восстановлении изображений по методу Люси – Ричардсона с 12,38 см на реальном ортофотоплане местности до 5,11 см на восстановленном. По методу слепой деконволюции ошибка координат в контрольных точках уменьшилась с 12,38 см до 5,99 см. Однако наибольший контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона наблюдалось у изображений, восстановленных по методу Винера (13,8) и методом слепой деконволюции (21,1).

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что разработанная методика определения ФРТ по априорной информации о параметрах полета, характеристиках камеры и параметрах экспозиции может быть использована для восстановления изображений, искаженных смазом. В результате восстановления изображений по методу Люси – Ричардсона ошибку координат в контрольных точках ортофотоплана местности удалось уменьшить в 2,42 раза (с 12,38 см до 5,11 см).

5 Экспериментальное исследование методов построения ортофотопланов

В разделе рассмотрена возможность применения разработанных методик для решения практических задач в области кадастра, землеустройства, маркшейдерского дела, контроля работоспособности активно-импульсных телевизионных измерительных систем.

5.1 Построение геопривязанного ортофотоплана местности с использованием опознавательных знаков

Показаны результаты испытаний с использованием опорных точек, без опорных точек и комбинированным методом. Приведены результаты применения разработанных методик при создании полигона для испытаний АИ ТИС, а также использования методик для подсчета насыпи полезных ископаемых.

В рамках данной работы проводился эксперимент по созданию геопривязанного ортофотоплана участка местности, на котором расположен радиотехнический корпус Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) и прилегающая к нему территория [113]. Данная территория используется в качестве полигона для испытаний активно-импульсных телевизионных измерительных систем, разрабатываемых на кафедре телевидения и управления ТУСУР [105]. Соответственно, основная цель эксперимента заключалась в создании цифровой модели полигона для упрощения процесса испытаний образцов систем на местности.

Для проведения авиационных работ и получения аэрофотоснимков использовался БПЛА вертолетного типа DJI PHANTOM 4 PRO. Он имеет на своем борту телевизионную камеру Sony с дюймовой матрицей и разрешением 20 мегапикселей, которая закреплена на трехосевом гиросtabilизирующем подвесе. Таким образом реализуется возможность проводить авиационные работы по заранее спланированному маршруту, а также производить интервальную съемку в надир.

Для привязки в модели геопространственных данных на этапе фотограмметрической обработки необходимо использовать опознавательные

знаки, координаты которых точно определены. Несколько опознавательных знаков были равномерно расположены на местности. Их точные координаты получены при помощи высокоточного геодезического ГНСС-приемника EFT M2 (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Определение координат опознавательных знаков на местности

Перед выполнением авиационных работ было сформировано полетное задание для БПЛА в программе для планирования маршрутов DroneDeploy (рисунок 5.2). Данное программное обеспечение дает возможность построить маршрут для площадной съемки путем выделения контура требуемого участка на космоснимке.

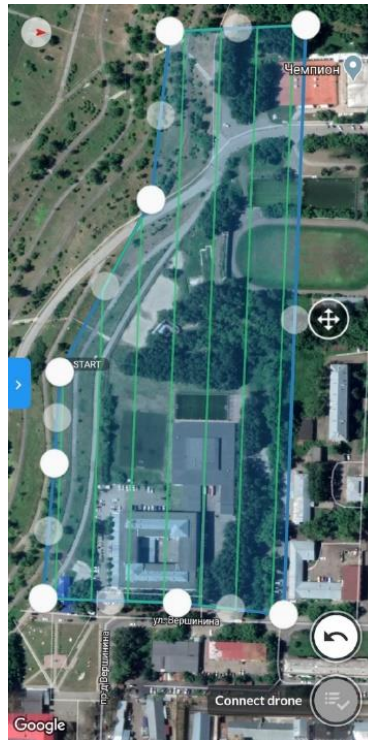


Рисунок 5.2 – Маршрут следования БПЛА

Приведены основные параметры полетного задания (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Параметры полетного задания

Параметр	Значение
Ориентация камеры	В надир
Высота полета БПЛА	80 м
Продольное перекрытие снимков	80%
Поперечное перекрытие снимков	75%
Скорость полета	6 м/с

В процессе выполнения полетного задания был получен видеоряд из 184 аэрофотоснимков.

Дальнейшая обработка полученных снимков осуществлялась в программном обеспечении для фотограмметрической обработки данных Agisoft Metashape. GPS-оборудование БПЛА записывает координаты центров снимков в системе WGS 84, а координаты опознавательных знаков были получены в местной системе координат МСК 70, зона 4. После импорта видеоряда в ПО координаты центров снимков были также переведены в систему МСК 70, зона 4.

На следующем этапе осуществлялось выравнивание фотографий. ПО определяет положение камер и строит разряженное «облако точек» (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Разреженное облако точек

На следующем этапе обработки производилась расстановка маркеров на фотографиях. Маркеры применяются для оптимизации результатов расчета положений камеры, что в свою очередь улучшает результат геопривязки конечной модели. После этого, основываясь на рассчитанных положениях камер, программа вычисляет карты глубины для каждой камеры, строит плотное «облако точек» и трехмерную модель местности (рисунок 5.4).



Рисунок 5.4 – Цифровая модель местности

На одном из завершающих этапов ПО строит карту высот. Она представляет собой модель поверхности в виде регулярной сетки значений высоты (рисунок 5.5).

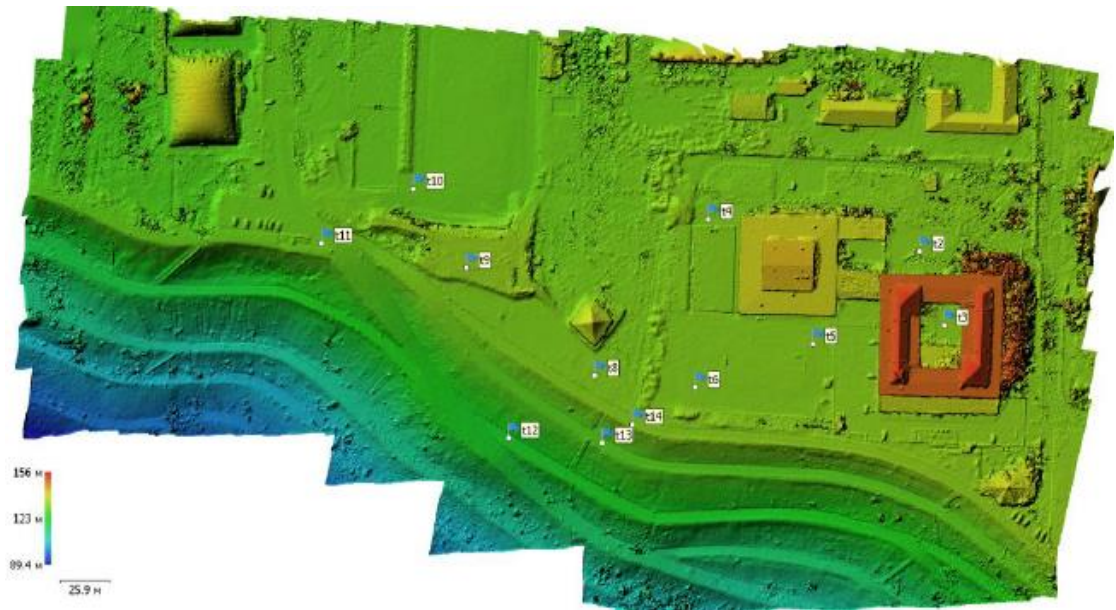


Рисунок 5.5 – Карта высот

Итоговым результатом фотограмметрической обработки аэрофотоснимков является ортофотоплан местности, который строится на основании исходных снимков, что позволяет создавать результирующее изображение высокого разрешения (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6 – Ортофотоплан местности

Проведена оценка плановой точности геопривязки конечного ортофотоплана местности. Для этого использовались опознавательные знаки, которые не участвовали в фотограмметрической обработке и уравнивании координат модели.

Сравнивались координаты опознавательных знаков, полученные с помощью геодезического ГНСС-приемника и координаты этих же знаков, полученные из построенного ортофотоплана местности. Результаты представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результат оценки точности модели

Название опознавательного знака	Ошибка координат, см
T3	1,27
T6	2,11
T14	1,65

Выводы

1. Применение БПЛА вертолетного типа DJI PHANTOM 4 PRO допустимо при изготовлении ортофотопланов участков местности.

2. Ошибка координат по контрольным точкам не превышает 3 см, что говорит о высокой точности построенной модели и делает возможными испытания активно-импульсных телевизионных измерительных систем по полученным результатам с целью определения точности их работы.

3. Результаты аэрофотосъемки применимы для построения топографических планов площадных объектов для различных практических применений.

5.2 Построение геопривязанного ортофотоплана местности без использования опознавательных знаков

Для проведения эксперимента использовалось следующее оборудование:

- БПЛА вертолетного типа DJI Phantom 4 Pro с ГНСС-приемником на борту;
- геодезический ГНСС-приемник Trimble R8;
- персональный компьютер;
- ПО Agisoft Metashape;
- ПО RTKLib.

Перед выполнением авиационных работ были выполнены необходимые подготовительные работы. Было сформировано полетное задание для БПЛА (рисунок 5.7), в котором указаны основные характеристики полета: маршрут, высота полета, скорость полета, продольное и поперечное перекрытие.

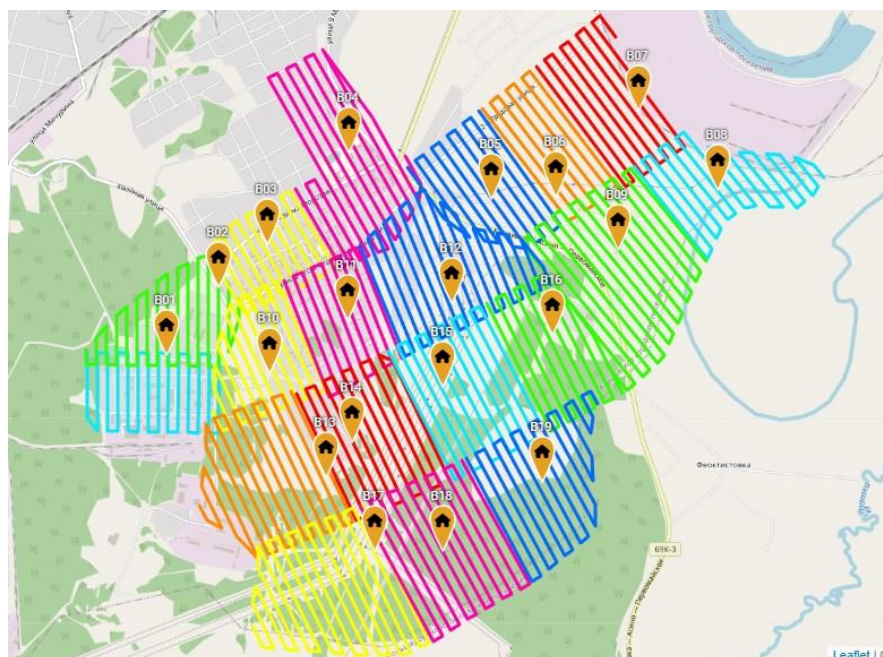


Рисунок 5.7 – Пример параметров полетного задания

На открытом участке исследуемой местности был установлен геодезический ГНСС-приемник, который принимал информацию от спутников и записывал данные спутниковых наблюдений в статическом режиме с частотой 5 Гц. Беспилотным летательным аппаратом были выполнены авиационные работы. В результате были получены видеоряд из аэрофотоснимков исследуемой местности (рисунок 5.8), а также данные с ГНСС-приемника БПЛА, которые содержат в себе события, указывающие на то, в какие моменты происходило срабатывание затвора телевизионной камеры.



Рисунок 5.8 – Пример полученного аэрофотоснимка

Обработка полученных материалов начинается с обработки ГНСС-данных с БПЛА и геодезического приемника. Обработка производится в специализированном ПО RTKLib. В результате в метаданные каждого снимка из видеоряда записывается точная координата центра фотографирования.

Дальнейшая обработка происходит в ПО для фотограмметрической обработки изображений Agisoft Metashape.

Аэрофотоснимки импортируются в ПО. На первом этапе выполняется выравнивание изображений. После выставления параметров обработки программа определяет положение камер и отображает их в окне программы (рисунок 5.9).



Рисунок 5.9 – Результат выравнивания изображений видеокамеры

Основываясь на рассчитанных положениях изображений, программа вычисляет карты глубины для каждого изображения и на их основе строит плотное облако точек (рисунок 5.10).



Рисунок 5.10 – Плотное облако точек

На стадии построения плотного облака точек ПО Metashape рассчитывает карты глубины для каждого изображения. Если текстура некоторых элементов сцены плохо выражена или изображение нечетко сфокусировано, а также вследствие цифрового шума некоторые точки могут быть неправильно

позиционированы. Для фильтрации выбросов Metashape имеет несколько встроенных алгоритмов, которые могут применяться в зависимости от задач конкретного проекта.

В эксперименте при обработке изображений использовалась агрессивная фильтрация карт глубины. При реконструкции области без значимых мелких деталей рекомендована к применению агрессивная фильтрация карт глубины, чтобы исключить максимальное число ошибочно позиционированных точек. Данное значение параметра обычно рекомендовано для обработки аэрофотоснимков.

На следующем этапе на основании построенного плотного облака строится карта высот. Карта представляет модель поверхности в виде регулярной сетки значений высоты (рисунок 5.11). Пространственное разрешение полученной модели 6.18 см/пикс.

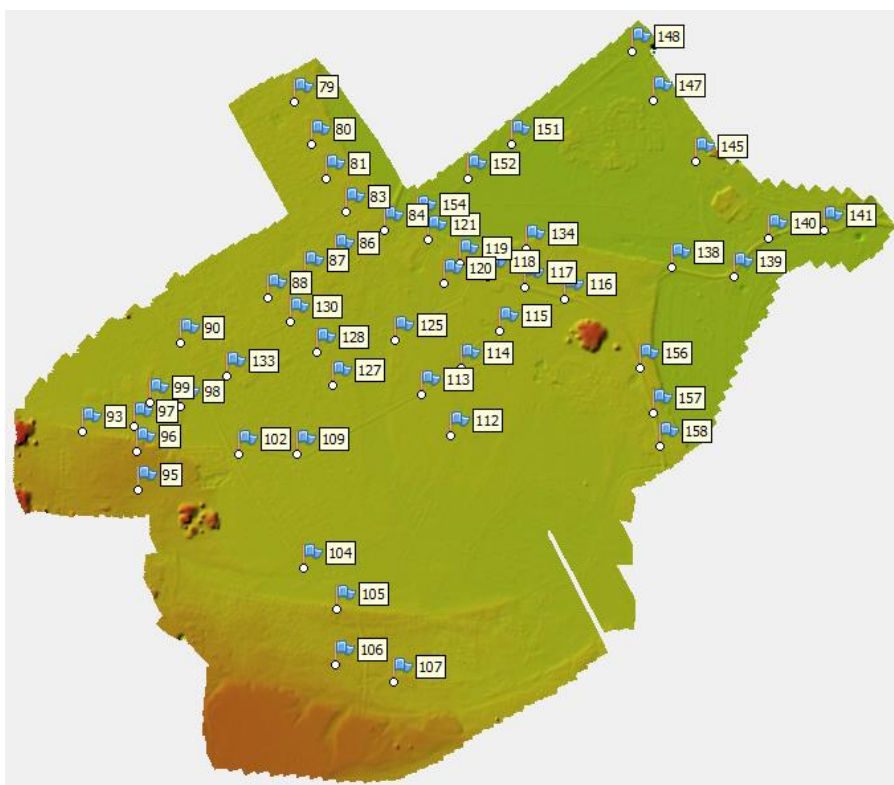


Рисунок 5.11 – Карта высот

Ортофотоплан местности (рисунок 5.12) строится на основании данных исходных снимков и реконструированной модели, что позволяет создавать результирующее изображение высокого разрешения.



Рисунок 5.12 – Ортофотоплан местности

В таблице 5.3 представлена ошибка определения координат в каждой контрольной точке, относительно измеренной инструментально геодезическим прибором.

Таблица 5.3 – Ошибка определения координат на контрольных точках

Номер контрольной точки	Ошибка, восточное указание, X, см	Ошибка, северное указание, Y, см	Ошибка, высота, Z, см
79	0,9	-1,5	-6,4
80	-1,6	-1,9	-10,9
81	-0,4	4,5	-4,1
83	1,2	-2,4	-3,1
84	0,5	-2,1	-5,5
86	1,5	-0,5	-7
87	0,9	-1,8	-11,2

Продолжение таблицы 5.3

88	1,1	-1,2	-3,4
90	-1,9	0,4	-8,5
93	-2,8	-1,9	-5,7
95	1,6	-0,3	-11,9
96	0,1	0	-11,9
97	0,1	0,6	-7,9
98	1,3	-3,8	-9,4
99	0,4	-2,5	-5,5
102	1,5	-2,9	-5,8
104	3,1	0	0,7
105	2,8	-0,7	-3,5
106	0,5	-1,9	0,9
107	5,8	0,8	-4
109	3,7	-5,2	-0,8
112	1,9	-4	4,6
113	2,7	-7,7	-0,4
114	3,5	-0,4	1,6
115	5,5	-1,4	-1,9
116	1,7	-3,6	-6,6
117	0,5	0,4	-4,6
118	4,2	0,9	-1,4
119	-0,3	-0,4	-0,6
120	-0,3	2,5	-1,3
121	-0,2	-1,5	-7
125	2,6	-0,7	-3,5
127	2,5	-4	-0,8
128	3,9	-2,3	0,9
130	0,8	-3	-6,6
133	3,1	-2,7	-6,6

Продолжение таблицы 5.3

134	-0,4	-2,5	-2,5
138	3,4	-1,8	0,8
139	0,2	-0,6	0
140	1,5	-0,5	-1
141	3,4	-1,4	-1,9
145	-1,2	0,6	0
147	-5,3	-3,26	-4,2
148	-3,3	-4,9	-1,7
151	1,4	-1,6	-3,8
152	-1,8	-2,7	-4,8
154	0,2	-2	-4,4
156	5,9	1	2,2
157	3,7	0	-5,7
158	1,6	1,2	-3,2

Пространственное разрешение полученного ортофотоплана составило 2,03 см/пиксель. Общая ошибка в плане и по высоте, по данным ПО, составила 2,5 см без использования опознавательных знаков при камеральной обработке.

Выводы

1. Полученный ортофотоплан местности имеет пространственное разрешение менее 5 см/пиксель, что соответствует требованиям масштаба 1:500.
2. Ошибка в определении географических координат объектов на ортофотоплане местности менее 10 см.
3. Можно утверждать, что способ изготовления ортофотоплана местности с помощью БПЛА вертолетного типа DJI Phantom 4 Pro с ГНСС-приемником на борту соответствует нормам и стандартам топографических планов масштаба 1:500 и может быть применим на практике при изготовлении топографических планов реальных объектов.

5.3 Комбинированная методика построения геопривязанного ортофотоплана местности

Результаты исследований опубликованы в [106]. Работы проводились в одном из населенных пунктов Томской области общей площадью 700 га. В ходе подготовительных работ выяснилось, что на объекте имеются источники сильных электромагнитных помех, которые могут влиять на качество приема сигнала со спутника. В связи с этим в качестве страхующей меры было принято решение о расположении на местности контрольных точек (опознавательных знаков), которые в случае получения некачественных данных спутниковых измерений можно применить в фотограмметрической обработке и обеспечить требуемую точность построения конечного ортофотоплана.

Среднее расстояние между опознавательными знаками составило 250 м. Общее количество опознаков – 103 шт. (рисунок 5.13).

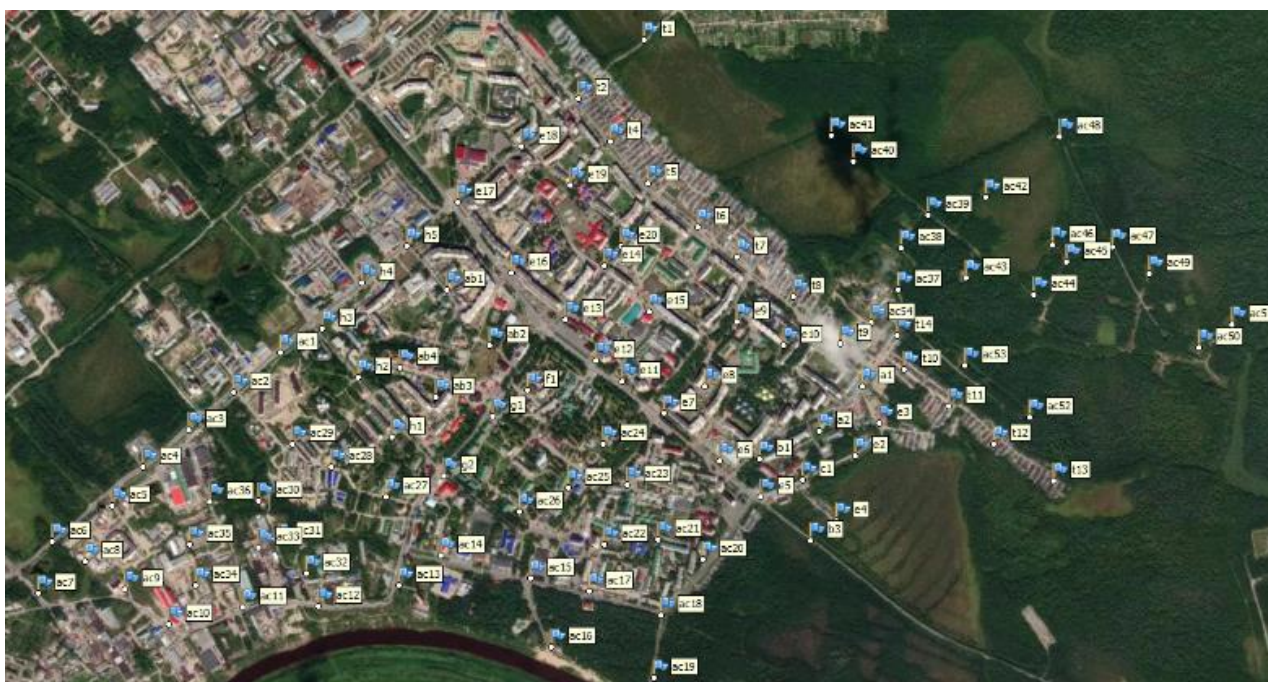


Рисунок 5.13 – Схема расположения опознавательных знаков на местности

Координаты опознавательных знаков были определены геодезическим ГНСС-приемником Trimble R8 в режиме RTK.

В качестве БВС использовался квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro. На его борту установлена телевизионная камера с разрешением 20 мегапикселей и механическим затвором, которая закреплена на гиросtabilизирующий трехосевой

подвес. Для позиционирования в пространстве и записи координат центров фотографирования используется установленный двухчастотный геодезический приемник AGNSS.

Для выполнения авиационных работ было сформировано 19 полетных заданий общей протяженностью 158 км (рисунок 5.14).

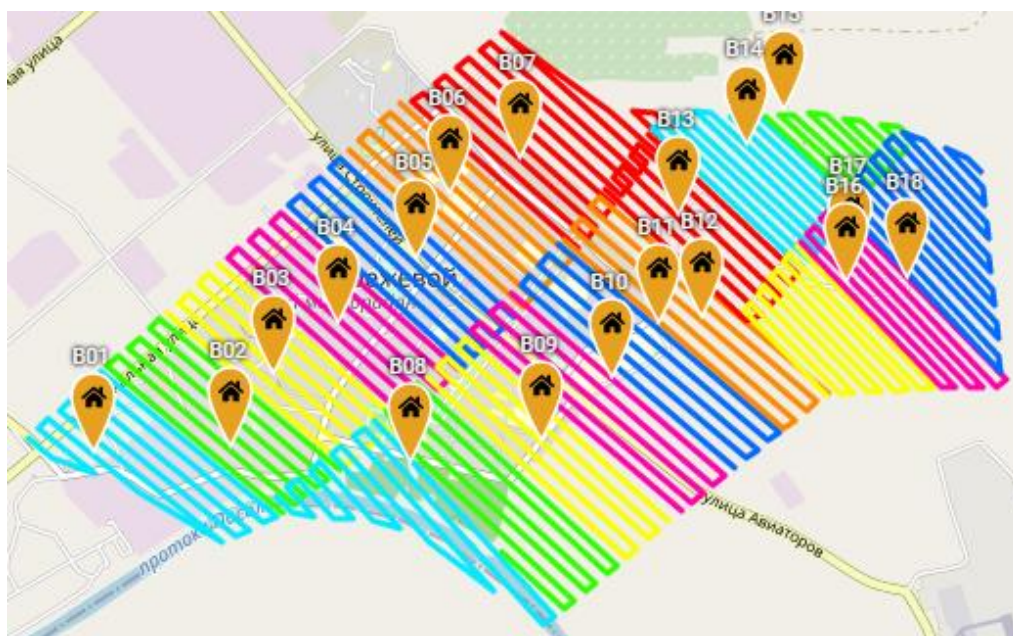


Рисунок 5.14 – Полетные задания для БПЛА

Основные параметры полетного задания приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Параметры полетного задания

Параметр	Значение
Ориентация камеры	В надир
Высота полета БПЛА, м	110
Продольное перекрытие снимков	85 %
Поперечное перекрытие снимков	60 %
Скорость полета, м/с	9

В процессе выполнения полетных заданий был сформирован видеоряд из 12408 аэрофотоснимков.

Расчет центров фотографирования и первичное выравнивание аэрофотоснимков по точным центрам в ПО Agisoft Metashape показали ошибку на контрольных точках до 15,5 см в плане в двух первых вылетах, по номерами B01 и

В02. На рисунке 5.15 ниже представлен график отношения сигнал/шум для первого вылета.

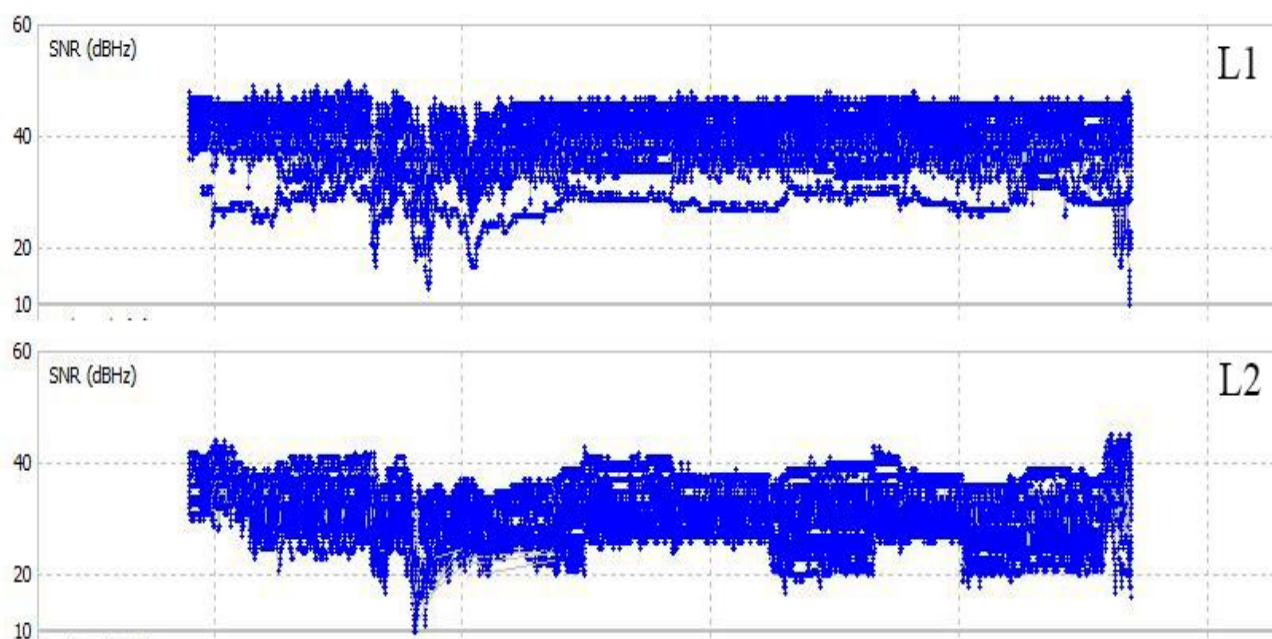


Рисунок 5.15 – График отношения сигнал/шум на частотах L1 и L2 для первого полета

На частотах L1 сигнал от спутника считается качественным, если отношение сигнал/шум лежит в пределах 30–50 dBHz. Как видно из рисунка 5.15, значения в первой половине полета опускаются до 10 dBHz и ниже. На частотах L2 сигнал от спутника считается качественным, если отношение сигнал/шум лежит в пределах 25–50 dBHz. На рисунке 5.15 значения также опускаются ниже 10 dBHz. Аналогичный график имеют данные спутниковых измерений во втором полете.

В результате анализа графиков отношения сигнал/шум можно сделать вывод о том, что данные значения могли быть вызваны источником сильной электромагнитной помехи или же устройством для подавления GPS-сигнала. Данная версия наиболее вероятна, так как в районе полетов на данной местности располагалась стоянка большегрузного транспорта, в которых очень часто используются устройства для подавления сигнала со спутника.

Дальнейшая обработка происходила комбинированным методом. При этом фотограмметрическая обработка первого и второго полетов осуществлялась с использованием контрольных точек в качестве опорных, игнорируя координаты центров фотографирования. В остальных шестнадцати полетах

фотограмметрическая обработка осуществлялась по точным координатам центров фотографирования.

В результате плановая ошибка в двух первых полетах была уменьшена, и максимальное отклонение в контрольных точках составило 8 см. Среднее значение точности геопривязки конечного ортофотоплана местности в плане составило 4 см.

Выводы

1. Применение описанного метода построения ортофотоплана местности позволяет компенсировать ошибки, вызванные сильными электромагнитными помехами либо устройствами подавления спутникового сигнала.

2. Полученным ортофотопланом местности можно пользоваться на практике для различных топографических работ, так как ошибка координат в контрольных точках не превышает 8 см, а пространственное разрешение полученного ортофотоплана местности составляет 2.73 см/пикс.

3. Недостатком данного метода являются большие временные затраты на полевые работы, так как требуется заложить контрольные точки на всю исследуемую местность.

4. К недостатку комбинированного метода можно отнести и тот факт, что часто контрольные точки физически невозможно разместить на местности, например, густой лес. Если сбой произойдет на такой местности, то полетное задание придется повторить.

5.4 Подсчет объема насыпи полезных ископаемых

Результаты данного исследования опубликованы в [107]. В процессе подготовки к полетам на местности была разложена сеть опознавательных знаков для точного определения плановой и высотной отметок при камеральной обработке. В качестве опознавательных знаков использовались пластиковые круги диаметром 10 см. Их координаты были точно определены геодезическим приемником Trimble R8. Далее было сформировано полетное задание для БПЛА (рисунок 5.16), в котором заданы скорость полета, высота, площадь исследуемой территории.

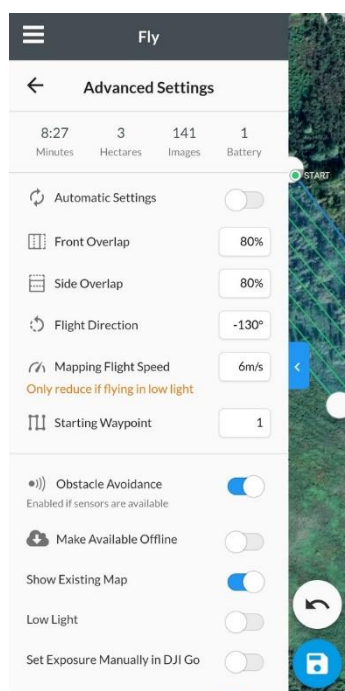


Рисунок 5.16 – Параметры полетного задания

Продольное и поперечное перекрытие снимков было задано с запасом и составляло более 80%. Как видно из рисунка 5.16, время полета над заданной территорией составило 8 минут 27 секунд. В результате выполнения полетного задания был сформирован видеоряд из 141 снимка. Камеральная обработка информации проводилась в программе для фотограмметрической обработки изображений Agisoft Photoscan. В результате было получено плотное облако точек (3D-модель) исследуемой территории (рисунок 5.17), а также выделена граница насыпи. По детализации и точности плотное облако точек можно сравнивать с результатом высокоточного лазерного сканирования.



Рисунок 5.17– 3D-модель исследуемой местности

Для производственных целей предприятия была построена карта высот (рисунок 5.18) и ортофотоплан местности. Разрешение ортофотоплана составило 1,6 см/пиксель.

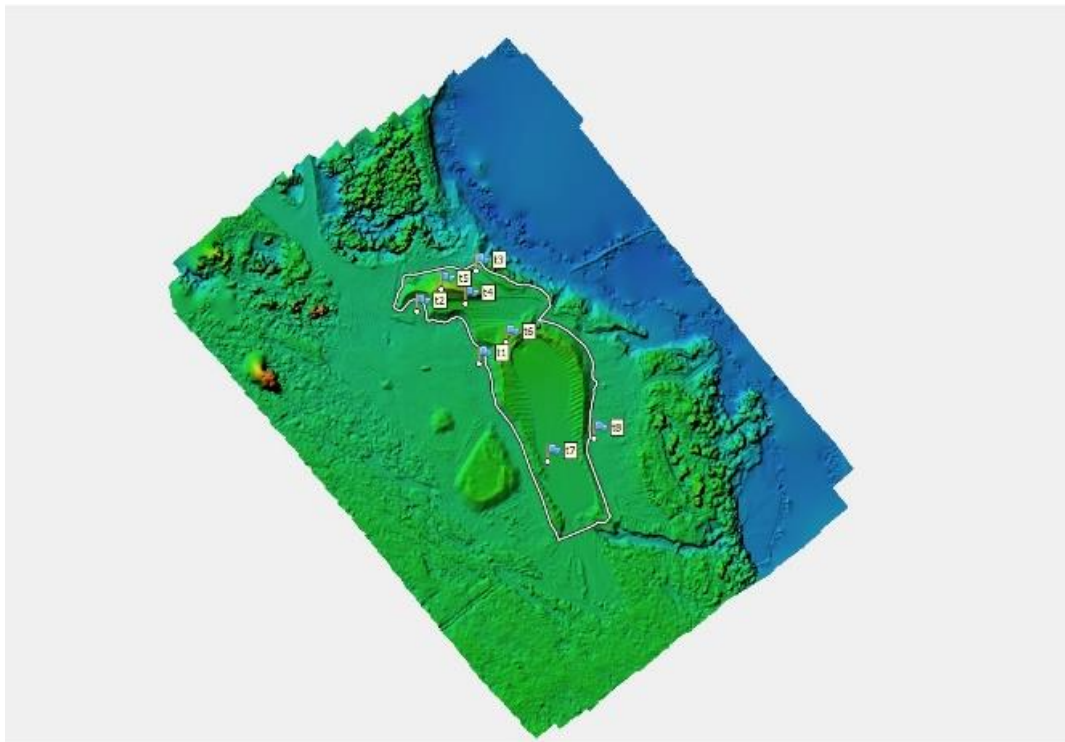


Рисунок 5.18 – Карта высот местности

На следующем этапе была удалена территория, прилегающая к насыпи, в результате чего была получена точная и детализированная модель склада готовой продукции (рисунок 5.19).

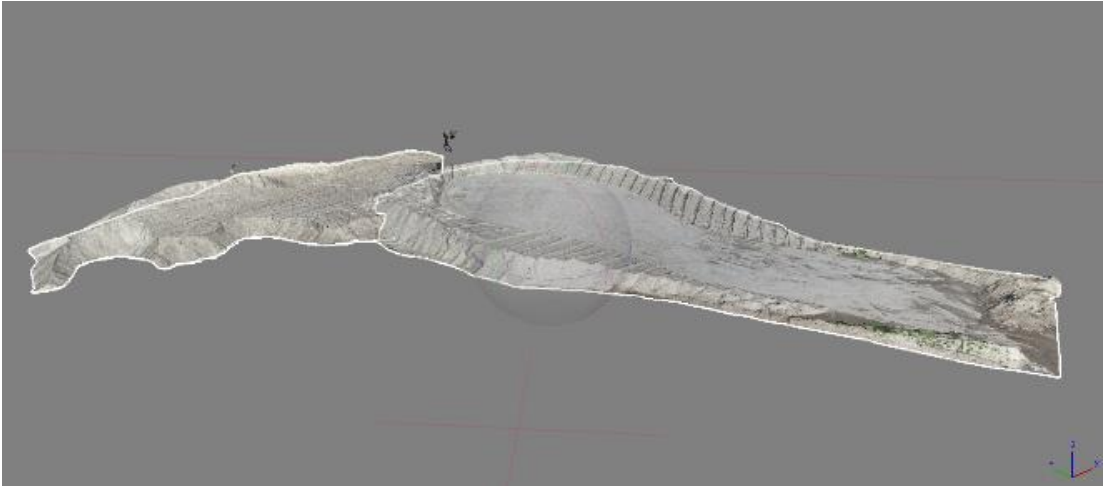


Рисунок 5.19 – 3D-модель склада готовой продукции

После экспорта данной модели дальнейшая обработка осуществлялась в программном продукте Autodesk Civil 3D. По импортированному плотному облаку точек склада готовой продукции была сформирована поверхность насыпи (рисунок 5.20).

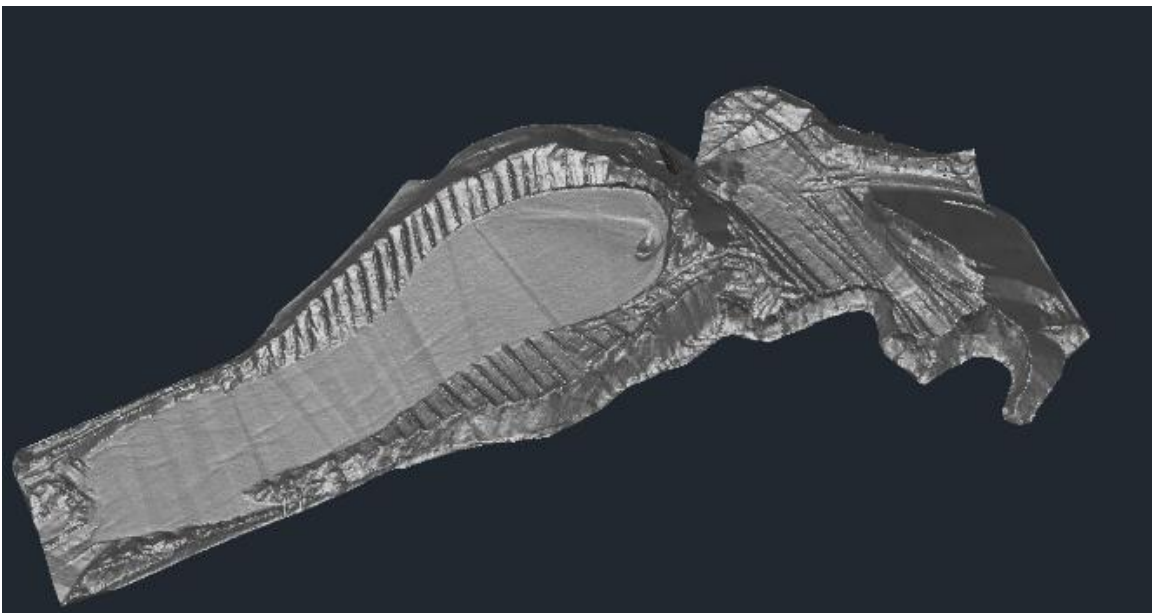


Рисунок 5.20 – Поверхность, построенная по плотному облаку точек

При обработке видеоряда была смоделирована нулевая поверхность – земля. После чего был подсчитан объем насыпи на основании разницы между нулевой поверхностью и поверхностью, построенной по плотному облаку точек склада готовой продукции.

Конечный результат отличался от инструментального метода подсчета объема на 62 м³, что составляет 0,57% от всего объема склада. Такая погрешность соответствует требованиям законодательства и контролирующих органов.

Выводы

1. Технология подсчета объемов на горнодобывающих предприятиях с использованием БПЛА вертолетного типа DJI Phantom 4 Pro соответствует требованиям по точности и достоверности оценки объемов полезных ископаемых.

2. Отличие между инструментальным и предложенным методами составила 0,57%.

3. Для проведения подобных работ от подготовки полетного задания до конечного результата на территории, по площади сопоставимой с той, которая исследовалась в эксперименте, требуется меньше суток и только один сотрудник.

4. Применение данной технологии позволит производить съемку в опасных и труднодоступных местах, не подвергая сотрудников предприятия неоправданным рискам.

5. Полеты БПЛА проходят в автоматическом режиме и не требуют от оператора специальных навыков управления ими.

6. Видеоряд обладает большей информативностью по сравнению с традиционной съемкой тахеометром.

7. Результаты аэрофотосъемки применимы для построения топографических планов горнодобывающих и других территориально-распределенных предприятий.

5.5 Построение цифровой модели полигона для испытания активно-импульсных телевизионных измерительных систем

По результатам проведенного исследования [114] получен акт испытаний от организации (приложение А). Полигон для испытаний АИ ТИС представляет собой неровный участок местности, на котором были расположены опознавательные знаки (опорные точки). Расположение опорных точек выбиралось таким образом, чтобы после проведения авиационных работ на их месте можно было расположить пронумерованные транспаранты, расстояние до которых будет измеряться макетом

АИ ТИС. Географические координаты этих точек были точно определены с помощью спутникового геодезического приемника Trimble R8 в режиме RTK. Геодезическая базовая станция была расположена в точке с известными координатами и передавала поправки на приемник. Опорные точки служат для проверки точности географической привязки ортофотоплана и цифровой модели местности, которые были получены в результате фотограмметрической обработки аэрофотоснимков. При этом с их помощью осуществлена проверка точности измерения расстояний макетом АИ ТИС.

Было подготовлено полетное задание для БПЛА. Основные параметры полетного задания: скорость полета 6 м/с; высота полета 80 м; продольное перекрытие аэрофотоснимка 80%; поперечное перекрытие аэрофотоснимка 60%. На используемом в работе квадрокоптере во время полета использовалось значение экспозиции фотоприемника в пределах от 1/500 с до 1/1600 с. При значении экспозиции менее 1/500 с появлялся смаз на изображениях. При значении экспозиции более 1/1600 с переставал работать механический затвор камеры, что приводило к резкому увеличению ошибки определения геопространственных данных построенной модели местности.

В результате выполнения полетного задания был сформирован видеоряд из 706 аэрофотоснимков.

Фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков происходила в лабораторных условиях по методике, описанной в разделе 3. В качестве основного программного обеспечения для построения цифровой модели местности использовалась программа Agisoft Metashape. Производилась обработка данных спутниковых наблюдений и расчёт центров фотографирования для каждого изображения, которые являются элементами внешнего ориентирования изображения (координаты центра проекции в системе координат объекта, углы поворота системы координат снимка относительно системы объекта). По этим данным с помощью уравнения коллинеарности рассчитываются координаты точек объектов на местности. В результате выравнивания аэрофотоснимков и оптимизации центров фотографирования получены следующие разности

определения координат контрольных точек на местности по аэрофотоснимкам и по результатам натуральных измерений с помощью геодезического приемника в режиме RTK (таблица 5.5). Результат натуральных измерений в данной работе считаются эталонными.

Таблица 5.5 – Разность определения координат контрольных точек на местности по аэрофотоснимкам и по результатам натуральных измерений

Название контрольной точки	Ошибка X, см	Ошибка Y, см	Ошибка Z, см
R1	-4	6	-2,5
R2	-5,1	4,3	-2
R3	-2,8	5,1	-4
R4	-2,9	4,9	1,4
R5	-2	6,7	-1

Как видно из таблицы 5.5, разность определения координат объектов между цифровой моделью и натурными измерениями с помощью геодезического прибора составляет не более 7 см. Данный факт указывает на то, что итоговая цифровая модель местности будет иметь высокую точность геопространственных данных и соответствовать масштабу 1:500. Данная методика может применяться для создания цифровых моделей местности с целью испытания АИ ГИС.

Смоделирована ситуация, когда авиационные работы проводились на БПЛА без геодезического приемника на борту. В этом случае обработка проводилась без точных значений элементов внутреннего и внешнего ориентирования аэрофотоснимков, а их вычисление происходило по контрольным точкам, которые использовались в качестве опорных. В таблице 5.6 приведена оценка влияния количества опорных точек на пространственную ошибку модели при обработке материалов без точных значений внутренних и внешних значений аэрофотоснимков.

Таблица 5.6 – Оценка влияния количества контрольных точек в качестве опорных на пространственную ошибку модели

Количество опорных пунктов	Ошибка координат в контрольных точках X, см	Ошибка координат в контрольных точках Y, см	Ошибка координат в контрольных точках Z, см
3	1	1	1,5
2	57,7	246	117,7
1	424,6	463,5	595,4
0	558,4	513,9	928,3

Из таблицы 5.6 следует, что ошибка координат в контрольных точках увеличивается с уменьшением количества участвующих в обработке точек. Минимальное количество опорных точек должно быть не менее трех на небольшой площади (до 10 га). Таким образом, применение БВС без геодезического приемника на борту влечет за собой дополнительные трудозатраты на необходимость использования опорных пунктов. Особенно это актуально на больших площадях и на территории со сложным рельефом.

На следующем этапе обработки данных было построено плотное облако точек. Плотное облако точек представляет собой точки с известными координатами (в системе координат объекта) и значения яркости, взятые на исходном изображении. Фрагмент построенного плотного облака точек представлен на рисунке 5.21.



Рисунок 5.21 – Плотное облако точек

Плотное облако точек представляет собой цифровую модель местности, на которой можно измерять расстояния между объектами с сантиметровой точностью. Соответственно, такая модель может использоваться для испытания АИ ТИС. В качестве дополнительного источника геопространственных данных был построен ортофотоплан местности, изображенный на рисунке 5.22.



Рисунок 5.22 – Фрагмент ортофотоплана местности

Далее по плотному облаку точек были измерены расстояния между контрольными точками, на которых располагались транспаранты (рисунок 5.23).



Рисунок 5.23 – Измерение расстояний по плотному облаку точек

После проведения авиационных работ на один из опознавательных знаков был установлен макет АИ ТИС. Макет устанавливался на полигоне таким образом, чтобы охватить все расположенные на местности транспаранты без необходимости перемещения системы, а только вращая макет вокруг своей оси на штативе для сохранения географической привязки к месту его установки. Транспаранты были установлены на месте расположения опознавательных знаков. Расположение транспарантов на полигоне представлено на рисунке 5.24.



Рисунок 5.24 – Расположение транспарантов

Измерение дальностей до объектов интереса макетом АИ ТИС выполнялось с использованием разработанного авторами многозонного метода измерения дальности (ММИД) [105].

В таблице 5.7 представлены результаты измерения расстояний до объектов на полигоне.

Таблица 5.7 – Расстояния до объектов

Объект измерения	Средство измерения		
	АИ ТИС, м	Геодезический прибор, м	Плотное облако точек, м
Транспарант 1	11,12	11	10,98
Транспарант 2	18,5	19,06	19,06
Транспарант 3	34,78	34,97	34,89
Транспарант 4	39,62	39,95	39,9

В таблице 5.8 представлена разность результатов измерения расстояний до объектов на полигоне с использованием АИ ТИС, геодезического прибора и цифровой модели местности.

Таблица 5.8 – Разность результатов измерения расстояний до объектов

Объект измерения	Разность измерений АИ ТИС и геодезического прибора, м	Разность измерений АИ ТИС и плотного облака точек, м	Разность измерений плотного облака точек и геодезического прибора, м
Транспарант 1	+0,12	+0,14	-0,02
Транспарант 2	-0,56	-0,55	-0,01
Транспарант 3	-0,19	-0,11	-0,08
Транспарант 4	-0,33	-0,28	-0,05

Выводы

1. Испытания показали, что точность геопространственных данных цифровой модели местности имеет сантиметровую погрешность измерения расстояний до объектов (0.01–0.08 м) на рассматриваемой трассе.

2. Высокая геопространственная точность полученной цифровой модели местности дает право утверждать, что она применима для тестирования точности измерения расстояний с использованием АИ ТИС.

5.6 Основные результаты раздела

В разделе рассмотрена возможность практического применения разработанных методик. Экспериментально подтверждена возможность построения ортофотоплана местности по точным центрам фотографирования совместно с контрольными точками. Ошибка определения координат на ортофотоплане местности уменьшена с 15,5 см до 8 см. Подсчитан объем склада готовой продукции полезных ископаемых. Построен цифровой двойник полигона для испытаний активно-импульсной телевизионной измерительной системы.

Заключение

Далее сформулированы основные результаты работы, подтверждающие достижение цели исследования по разработке методов проведения авиационных работ и камеральной обработке результатов аэровидеосъемки.

1. Разработана методика проведения авиационных работ, включающая в себя подготовительные работы на местности, создание контрольных точек, создание полетного задания, авиационные работы, а также контроль полученных видеоданных и радиотехнических измерений.

2. Разработана методика обработки результатов аэрофотосъемки и радиотехнических измерений, включающая обработку спутниковых данных с базовой станции и борта БПЛА. Осуществлено построение ортофотопланов местности по точным центрам фотографирования совместно с контрольными точками. Построенные ортофотопланы местности по точности и разрешению соответствуют масштабу 1:500. Ошибка определения координат на контрольных точках не превышает 10 см в плане.

3. Предложен способ определения ФРТ изображений исходя из априорной информации. В качестве такой информации выступают данные о сенсоре камеры, его физических размерах, количестве пикселей и фокусном расстоянии. Кроме того, в априорной информации относится высота полета БПЛА, скорость полета и время экспонирования кадра. С применением априорной информации была вычислена ФРТ каждого кадра видеоданных, используемая при восстановлении смазанных изображений и увеличении контраста яркости между объектом интереса и фоном изображения.

4. Предложена методика восстановления смазанных изображений, полученных в результате недостаточно короткой экспозицией кадра в силу неблагоприятных условий полета либо быстрого движения БПЛА. Путем устранения смаза ошибка координат на контрольных точках была уменьшена в 2,42 раза (с 12,38 см до 5,11 см).

5. Проведены натурные испытания разработанных методик. Получены 9 актов использования материалов диссертации (приложение А).

Таким образом, в научно-квалификационной работе в соответствии с сформулированной целью содержится решение задач по разработке методик проведения авиационных работ, методик обработки материалов аэрофотосъемки, а также методик восстановления смазанных изображений и увеличения точности конечного ортофотоплана местности, имеющих существенное значение для отрасли знаний фотоники и оптико-электронного приборостроения.

Рекомендации по использованию результатов исследования:

1. Для проведения авиационных работ и построения геопривязанных ортофотопланов местности, соответствующих масштабу 1:500, рекомендуется использовать предложенные методики.

2. Для увеличения точности географической привязки ортофотопланов местности, а также для уменьшения смаза на изображениях рекомендуется использовать способ определения ФРТ, которая в свою очередь используется для восстановления изображений.

Дальнейшим развитием исследований в данном направлении является разработка методов и алгоритмов, направленных на более качественную обработку изображений, полученных в сложных условиях в реальном времени.

Сокращения, обозначения, термины и определения

БПЛА – беспилотный летательный аппарат

АИ ТИС – активно-импульсная телевизионная измерительная система

ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система

РРК – post processing kinematic (кинематика в постобработке)

РТК – real time kinematic (кинематика в реальном времени)

ГГС – государственная геодезическая сеть

СНТ – садовое некоммерческое товарищество

СКО – среднеквадратическое отклонение

МСК – местная система координат

ПО – программное обеспечение

ФРТ – функция рассеяния точки

ММИД – многозонный метод измерения дальности

Список использованных источников

1. Худайбердин, А. Р. Аэрофотосъемка как метод дистанционного зондирования / А. Р. Худайбердин // Актуальные проблемы геодезии, кадастра, рационального земле- и природопользования : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Тюмень, 24 ноября 2017 г.) / отв. ред. А. М. Олейник. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2018. – С. 196–199.
2. Антипов, И. Т. Развитие фотограмметрии в России / И. Т. Антипов // Гео-Сибирь. – 2010. – № 5 – С. 97–132.
3. Ашиккалиев, А. Х. Аэрофотосъемка земельного участка в целях оптимизации земельного кадастра / А. Х. Ашиккалиев, О. А. Канайкина, А. Б. Аршимбаева // Материалы конференций ГНИИ «НАЦРАЗВИТИЕ» : сборник избранных статей (Санкт-Петербург, 25–30 июня 2018 г.). – СПб. : Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2018. – С. 35–38.
4. Мишиева, А. Т. Использование БПЛА для составления ортофотоплана и кадастрового плана / А. Т. Мишиева // Мониторинг. Наука и технологии – 2021. – № 1(47). – С. 84–89.
5. Маклакова, Т. В. Использование беспилотных летательных аппаратов в кадастре, землеустройстве и градостроительстве / Т. В. Маклакова // Лучшая научно-исследовательская работа 2018 : сборник статей XVII Международного научно-исследовательского конкурса (Пенза, 20 ноября 2018 г.) / под общ. ред. Г. Ю. Гуляева. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. – С. 95–97.
6. Хрущ, Р. М. Фотопланы (ортофотопланы): сущность, содержание и развитие методов, способов и средств трансформирования снимков / Р. М. Хрущ // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2018. – Т. 10, № 3. – С. 94–102.
7. Ессин, А. С. Разработка методики пространственной фотограмметрической обработки материалов цифровой аэрофотосъемки, полученной с беспилотного летательного аппарата / А. С. Ессин, С. С. Ессин // Сб.

материалов науч. конф. «ГЕО-Сибирь – 2007». – Новосибирск : СГГА, 2007. – Т. 3. – С. 48–52.

8. Gairabekov I. G., Hamzatov A. I., Mishieva A. T., Ibragimova E. I., Gairabekov M-B. I., Gayrabekova A. I. Development of a digital surface model and a digital terrain model based on ERS data. 3rd International Symposium on Engineering and Earth Sciences (ISEES 2020).

9. Краснопевцев, Б. В. Методическое пособие, программы и контрольная работа по курсу «Фотограмметрия» / Б. В. Краснопевцев, В. М. Курков – М.: МИИГАиК, 2012. – 74 с.

10. Михайлов, А. П. Конспект лекций по курсу «Фотограмметрия» / А. П. Михайлов, А. Г. Чибуничев. – МИИГАиК, 2005.

11. Михайлов, А. П. Фотограмметрия: учебник для вузов / А. П. Михайлов, А. Г. Чибуничев; под общ. ред. А. Г. Чибуничева. – М.: Московский государственный университет геодезии и картографии, 2016. – 294 с.

12. Ткачева, О. А. Применение данных дистанционного зондирования в кадастровой деятельности / О. А. Ткачева, Е. Г. Мещанинова // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ). Серия: Социально-экономические науки. – 2017. – № 2. – С. 76–82.

13. Краснопевцев, Б. В. Фотограмметрия / Б. В. Краснопевцев. – М. : УПП «Репрография» МИИГАиК, 2008. – 160 с.

14. Мещанинова, Е. Г. Фотограмметрия и дистанционное зондирование территории : для студентов специальностей 120301 «Землеустройство», 120302 «Земельный кадастр» / Е. Г. Мещанинова, О. А. Ткачева ; Министерство сельского хозяйства РФ ; Департамент научно-технологической политики и образования ; ФГБОУ ВПО «Новочеркасская государственная мелиоративная академия». – Новочеркасск, 2013. – 109 с.

15. Приказ Минэкономразвития от 17 августа 2012 г. № 518 «О требованиях к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, а также контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке».

16. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов, ГКИНП (ГНТА)-02-036-02, утверждена приказом Федеральной службой геодезии и картографии России от 11.06.2002 № 84-ПР. – М. : ЦНИИГАиК, 2002.

17. Чибуничев, А. Г. О возможностях применения цифровых методов фотограмметрии для решения инженерных задач / А. Г. Чибуничев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1990. – № 6. – С. 76–82.

18. Алябьев, А. А. Фотограмметрия в кадастре недвижимости / А. А. Алябьев, К. А. Литвинцев, А. А. Кобзев // Геодезия и картография. – 2021. – Т. 82, № 8. – С. 27–35.

19. Калантаров, Е. И. Универсальные методы цифровой фотограмметрии / Е. И. Калантаров, А. В. Говоров, Д. А. Никишин // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2003. – № 6. – С. 47–55.

20. Лимонов, А. Н. Прикладная фотограмметрия : учебник для вузов / А. Н. Лимонов, Л. А. Гаврилова. – М. : Академический проект, 2016. – 256 с.

21. Гарагуль, А. С. Применение современных технологий создания цифровых крупномасштабных ортофотопланов территории сельских поселений / А. С. Гарагуль, М. О. Громов, Н. Н. Фокин // Цифровое сельское хозяйство региона: основные задачи, перспективные направления и системные эффекты : сборник материалов Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию экономического факультета (Омск, 25 апреля 2019 г.). – Омск : Омский ГАУ, 2019. – С. 274–278.

22. Шершень, А. И. Аэрофотосъемка. Летносъёмочный процесс / А. И. Шершень. – М., 1949.

23. Жердев, Е. В. Дизайн фототехники: от механических до цифровых систем / Е. В. Жердев, А. В. Безин // Декоративное искусство и предметно-пространственная среда. Вестник МГХПА. – 2016. – № 1–1. – С. 207–223.

24. Салемгараева, Л. Р. История развития аэрофотосъемки в России / Л. Р. Салемгараева // Актуальные проблемы геодезии, картографии, геоинформатики и кадастра : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Уфа, 8 апреля 2016 г.). – Уфа : Башкирский государственный университет, 2016. – С. 170–172.

25. Кусов, В. С. История аэрофотосъемки в фотографиях: славянский вклад / В. С. Кусов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1992. – № 6. – С. 54–61.

26. Жуков, Д. С. Опыт использования аэрофотосъемки и исторических карт в исторических исследованиях. Литература, методы, кейсы / Д. С. Жуков, С. К. Лямин, К. С. Кунавин // Инноватика и экспертиза: научные труды. – 2019. – № 3(28). – С. 44–63.

27. Гостюхина, Д. Ф. Современное тематическое картографирование / Д. Ф. Гостюхина // Геосфера : сборник научных статей студентов, магистрантов и аспирантов географического факультета (Уфа, 14 ноября 2017 г.) / отв. ред. А. Ф. Нигматуллин. – Уфа : Башкирский государственный университет, 2017. – С. 95–97.

28. Глушков, В. В. Аэрофоторазведка как предтеча аэрофототопографии / В. В. Глушков // Природа. – 2012. – № 11(1167). – С. 84–87.

29. Гермак, О. В. БПЛА – фотограмметрия / О. В. Гермак // Новая наука: Проблемы и перспективы. – 2015. – № 6–2. – С. 147–149.

30. Лозовая, С. Ю. Фотограмметрия и дистанционное зондирование территорий : Практикум : учеб. пособие / С. Ю. Лозовая, Н. М. Лозовой, А. В. Прохоров. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2012. – 168 с.

31. ГОСТ Р 59328-2021 Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. Утверждено Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии. 19 февраля 2021 г. № 85.

32. Лимонов, А. Н. Прикладная фотограмметрия : учебник для вузов / А. Н. Лимонов, Л. А. Гаврилова. – М. : Академический проект, 2016. – 256 с.

33. Обоснование возможности создания цифрового ортофотоплана с использованием современных информационных технологий / Е. В. Козин, А. Г. Карманов, Н. А. Карманова, М. Ю. Аванесов // Информация и космос. – 2021. – № 2. – С. 143–146.

34. Создание ортофотоплана с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) / У. Э. Кайрат, А. Т. Тыныбекова, Н. Ы. Исмаилов, Е. Г. Родионова // Наука и инновационные технологии. – 2022. – № 1(22). – С. 109–114.

35. Мельничук, Ю. Ю. Аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов / Ю. Ю. Мельничук // Землеустройство и кадастры: актуальные проблемы и пути их решения : сборник научных трудов молодых исследователей (Волгоград, 01 января 2018 г.). – Волгоград : Волгоградский государственный аграрный университет, 2019. – С. 62–65.

36. Григорьев, И. И. Исследование возможностей применения беспилотного летательного аппарата (квадрокоптера) в географических исследованиях / И. И. Григорьев // Вопросы социально-экономического и инновационного развития территорий, рационального природопользования и туризма в современных географических исследованиях : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Нукус, 26–27 октября 2021 г.) / Министерство высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан, Каракалпакский государственный университет имени Бердаха, Географическое общество Узбекистана, Географическое общество Таджикистана. – Нукус : Каракалпакский государственный университет, 2021.

37. Середа, Н. В. Перспективы применения квадрокоптеров и беспилотных летательных аппаратов для визуальной проверки состояния воздушных линий электропередачи / Н. В. Середа // Неделя науки – 2018 : сборник материалов XXXIX итоговой науч.-техн. конф. преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ (23–28 апреля 2018 г.). – Махачкала : Дагестанский государственный технический университет, 2018. – С. 117–119.

38. Жиделев, А. Р. Квадрокоптер как вид беспилотных летательных аппаратов / А. Р. Жиделев, А. А. Складов // Вестник современных исследований. – 2018. – № 5.3(20). – С. 435–436.

39. Ermachenko, N. V. Existing flight safety systems of multi-rotor unmanned aerial vehicles / N. V. Ermachenko, A. O. Evdokimov // Modern Science. – 2017. – № 6–1. – P. 27–29.

40. Майоров, Н. Н. Автоматизация процесса идентификации объектов при выполнении автономных полетных заданий беспилотной авиационной системой / Н. Н. Майоров, А. С. Костин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 640–646. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-2-640-646.

41. Зулькарнаев, В. У. Практическое применение беспилотных летательных аппаратов в современном мире / В. У. Зулькарнаев, В. Р. Камалова // Инновации в науке. – 2016. – № 56–2. – С. 23–27.

42. Карпова, Т. Ю. Эксплуатация беспилотных авиационных систем / Т. Ю. Карпова, А. С. Костин, Н. Н. Майоров. – СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – 169 с.

43. Павлова, А. И. Создание цифровой модели рельефа с использованием беспилотного летательного аппарата / А. И. Павлова, В. К. Каличкин, А. В. Каличкин // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2019. – Т. 49. – № 3. – С. 70–78. – DOI 10.26898/0370-8799-2019-3-9. – EDN HDCAAA.

44. Федупин, А. М. Перспективы применения крупноразмерных БПЛА при решении задач комплексного обследования территорий / А. М. Федупин, Д. М. Дрягин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1(218). – С. 271–281. – DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-271-281.

45. Ткачева, О. А. Применение данных дистанционного зондирования в кадастровой деятельности / О. А. Ткачева, Е. Г. Мещанинова // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ). Серия: Социально-экономические науки. – 2017. – № 2. – С. 76–82.

46. Завгородняя, Д. В. Использование ГНСС-технологий для определения пространственного местоположения беспилотного летательного аппарата / Д. В. Завгородняя // Инновационные технологии в науке и образовании : сборник

статей VI Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2017. – С. 279–282

47. Экспериментальное сравнение ГНСС-приёмников и ГНСС-антенн / Ф. В. Передерин, Н. К. Розенберг, И. М. Алешин [и др.] // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН : тезисы докладов и программа конф. (Москва, 27–29 октября 2021 г.). – М. : Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 2021. – С. 56.

48. Chymyrov, A. U. Accuracy analysis of the satellite positioning by using GNSS reference stations / A. U. Chymyrov, Sh. S. Sargazakova, N. Y. Ismailov // The Herald of Kyrgyz state university of construction, transport and architecture named after N. Isanov. – 2020. – № 3(69). – P. 350–354.

49. Кубанычбекова, Д. К. Использование RTK-режима систем глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС при создании геодезических сетей / Д. К. Кубанычбекова, А. К. Орозобекова // Современные проблемы механики. – 2019. – № 35(1). – С. 21–28.

50. Mapping quality prediction for RTK/PPK-equipped micro-drones operating in complex natural environment / E. Cledat, L. V. Jospin, D. A. Cucci, J. Skaloud // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2020. – Vol. 167. – P. 24–38.

51. Гурова, А. В. Разработка программной платформы для создания систем подготовки полетных заданий / А. В. Гурова, Е. В. Матвеев, А. Н. Поляков // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – № 2. – С. 7–9.

52. Матвиенко, Ю. А. Особенности построения ортофотоплана по данным БПЛА / Ю. А. Матвиенко, В. В. Набиуллин, М. Ю. Катаев // Электронные средства и системы управления : материалы докладов Междунар. науч.-практ. конф. – Томск, 2021. – № 1-2. – С. 100–102.

53. Богатов, Н. В. Управление и анализ полёта квадрокоптера при задании сложной траектории движения / Н. В. Богатов, А. С. Костин // Системный анализ и логистика. – 2020. – № 4(26). – С. 3–12.

54. Киричек, Р. В. Программно-аппаратный комплекс планирования автономных полётов для беспилотных летательных аппаратов общего пользования

/ Р. В. Киричек, Е. Е. Ястребов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : сборник научных статей V Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. (Санкт-Петербург, 10–11 марта 2016 г.). – СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2016. – С. 405–410.

55. Октябрьский, В. В. Методика компенсации неравномерно распределенного смаза аэрофотоснимков многоматричных цифровых аэрофотоаппаратов планово-перспективной съемки в условиях недостаточной освещенности местности / В. В. Октябрьский, А. С. Островский, Р. С. Саламан // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. – 2021. – № 677. – С. 107–117.

56. Аникеева, И. А. Факторы, критерии и требования к изобразительному качеству материалов аэрофотосъемки, получаемой для целей картографирования / И. А. Аникеева // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 104–119.

57. Аникеева, И. А. Оценка изобразительного качества материалов аэро- и космической съёмки / И. А. Аникеева // Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка : сборник статей по итогам науч.-техн. конф. – 2019. – № 10–1. – С. 72–77.

58. Курячая, Е. А. Методы и средства компенсации сдвига изображения / Е. А. Курячая, А. Р. Баширова // Общество знаний: стратегии, процессы, технологии : сборник статей. – М. : ООО «ИМПУЛЬС», 2018. – С. 56–59.

59. Варнаков, Д. Н. Оценка качества аэрофотоснимков при проведении фотограмметрических работ / Д. Н. Варнаков, Т. И. Ведерникова, И. Н. Савкин // System Analysis and Mathematical Modeling. – 2021. – Т. 3. – № 2. – С. 135–144.

60. Purkait, P. Rolling Shutter Correction in Manhattan World / P. Purkait, C. Zach, A. Leonardis // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision : 16. – Venice, 2017. – P. 882–890.

61. Пилипко, Н. Е. Особенности работы КМОП-фотоприемника в режиме бегущего электронного затвора / Н. Е. Пилипко, А. Е. Рычажников // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2008. – № 1. – С. 40–54.

62. Модель фотоприемника для исследования искажений в системах астроориентации с бегущим затвором / А. А. Манцветов, А. В. Морозов, А. И. Бобровский [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2018. – № 1. – С. 17–25.

63. Абдувахидов, А. А. Исследование точности фотограмметрической обработки аэрофотоснимков по данным определения их положения и ориентации с помощью инерциальной и GPS систем / А. А. Абдувахидов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2002. – № 6. – С. 81–88.

64. Монтиэль, А. Э. Р. Разработка и исследование фотограмметрических технологий мониторинга береговой линии по материалам аэрофотосъемки : специальность 25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Монтиэль Андраде Эдгар Рубен. – М., 2016. – 22 с.

65. Гостюхина, Д. Ф. Современное тематическое картографирование / Д. Ф. Гостюхина // Геосфера : сборник научных статей студентов, магистрантов и аспирантов географического факультета (Уфа, 14 ноября 2017 г.) / отв. ред. А. Ф. Нигматуллин. – Уфа : Башкирский государственный университет, 2017. – С. 95–97.

66. Дубиновский, В. Б. Особенности технологических вариантов обновления топографических карт и планов на основе аэроснимков, трансформированных по элементам внешнего ориентирования / В. Б. Дубиновский, Р. А. Коршунов, Е. В. Асташева // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1994. – № 1. – С. 78–84.

67. Алябьев, А. А. Фотограмметрия в кадастре недвижимости / А. А. Алябьев, К. А. Литвинцев, А. А. Кобзев // Геодезия и картография. – 2021. – Т. 82, № 8. – С. 27–35.

68. Мещанинова, Е. Г. Фотограмметрия и дистанционное зондирование территории: для студентов специальностей 120301 «Землеустройство», 120302 «Земельный кадастр» / Е. Г. Мещанинова, О. А. Ткачева ; Министерство сельского хозяйства РФ ; Департамент научно-технологической политики и образования; ФГБОУ ВПО «Новочеркасская государственная мелиоративная академия». – Новочеркасск, 2013. – 109 с.

69. Цветков, В. Я. Методы дистанционного зондирования / В. Я. Цветков. – М. : Московский государственный университет геодезии и картографии, 2009. – 80 с.

70. Арешев, Д. С. Оценка качества цифровой обработки изображений, полученных при аэрофотосъемке беспилотными летательными аппаратами / Д. С. Арешев // Информационно-технологический вестник. – 2021. – № 4(30). – С. 83–88.

71. Зверев, А. Т. Специфика получения данных с беспилотного летательного аппарата / А. Т. Зверев, Е. В. Фисенко // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 5. – С. 27–29.

72. Сонюшкин, А. В. Сравнение методов построения ЦМР по стереопарам космической съемки высокого пространственного разрешения / А. В. Сонюшкин // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 1. – С. 43–52.

73. Литвинов, Д. В. Современные методы аэрофотосъемки при архитектурно-планировочном анализе городской территории / Д. В. Литвинов // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2015. – № 1(18). – С. 35–41.

74. Чибуничев, А. Г. Автоматическое построение плотного облака точек по множеству снимков на основе полуглобального метода отождествления соответственных точек / А. Г. Чибуничев, А. П. Михайлов, В. В. Старшов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015.

75. Саврасов, П. А. Методы выделения трёхмерных объектов в плотном облаке точек / П. А. Саврасов, А. П. Арбузов // Студенческая научная весна : Тезисы докладов Всерос. студенческой конф., посвященной 175-летию Н. Е. Жуковского

(Москва, 01–30 апреля 2022 г.). – М. : ИД «Научная библиотека», 2022. – С. 226–227.

76. Исследование возможностей фотограмметрической обработки изображений в Agisoft Metashape, Pix4d и Bentley contextcapture / А. С. Молоко, К. В. Колюк, Е. С. Шабалина, В. Ю. Ширшова // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование : сборник материалов III Всерос. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 06–08 ноября 2019 г.) / науч. ред. О. А. Лазебник. – СПб. : Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 2019. – С. 42–48.

77. Поляков, Д. А. Создание трехмерной модели местности по данным съемки с беспилотного летательного аппарата / Д. А. Поляков, В. К. Барбасов, А. В. Гречищев // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. – 2021. – Т. 2, № 6. – С. 87–92. – DOI 10.23885/2500-123X-2021-2-6-87-92. – EDN FZNLUS.

78. Руководство пользователя Agisoft Metashape [Электронный ресурс] – URL: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_ru.pdf (дата обращения: 25.08.2021).

79. Недумов, С. Б. Анализ точности фототриангуляции и построения ортофотоплана по цветным аэрофотоснимкам / С. Б. Недумов, И. М. Сутугина, С. А. Шанская // Информация и космос. – 2005. – № 4. – С. 48–52.

80. Исследование влияния количества опорных знаков на точность построения ортофотоплана при различных высотах фотографирования беспилотными летательными аппаратами / И. В. Горяинов, С. В. Аверьянов, Е. В. Дельфонцев, М. В. Алешин // Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка : сборник статей по итогам науч.-техн. конф. – 2020. – № 11. – С. 38–40.

81. Чопик, И. С. Построение ортофотоплана по материалам аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата в по Agisoft Photoscan / И. С. Чопик, Я. В. Исаева // Математическое моделирование и информационные технологии при исследовании явлений и процессов в различных сферах

деятельности : сборник материалов Междунар. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, посвященной 70-летию кафедры высшей математики (Краснодар, 19 февраля 2021 г.) / отв. за выпуск Н. В. Третьякова. – Краснодар : Новация, 2021. – С. 443–448.

82. Жумарь, П. В. Создание ортофотоплана по материалам аэрофотосъемки с помощью ЦФС Photomod для построения цифровой модели рельефа / П. В. Жумарь, Р. И. Олейник // Землеустройство, геодезия и кадастр: прошлое – настоящее – будущее : сборник научных статей по материалам Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 95-летию землеустроительного факультета (Горки, 25–27 сентября 2019 г.) / редколлегия: А.В. Колмыков (гл. ред.) [и др.]. – Горки : Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2020. – С. 179–186.

83. Салимулина, Н. В. Построение ортофотоплана на ЦФС Photomod / Н. В. Салимулина // XLV итоговая студенческая научная конференция УдГУ (Ижевск, 10–16 апреля 2017 г.) / ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет». – Ижевск : ИД «Удмуртский университет», 2017. – С. 68–70.

84. Коршунов, Р. А. Нецентральная обратная фотограмметрическая засечка / Р. А. Коршунов, В. В. Носков, В. В. Погорелов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 5. – С. 67–71.

85. Scharstein D., Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms // *Int. Journal of Computer Vision* 47. – April–June 2002. – P. 7–42

86. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2006. – 1072 с.

87. Cho S., Matsushita Y., Lee S. Removing non-uniform motion blur from images // *Proc. ICCV*. 2007. P. 1–8.

88. Lai W.-S., Huang J.-B., Hu Z., Ahuja N., Yang M.-H. A comparative study for single image blind deblurring // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – IEEE, 2016. – P. 1701–1709.

89. Шемяков, А. М. Разработка алгоритмов восстановления расфокусированных и смазанных изображений текста в задачах распознавания / А. М. Шемяков // Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017 : материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 т. (Суздаль, 05–07 июля 2017 г.). – Суздаль : Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, 2017. – С. 21–24.

90. Шемяков, А. М. Разработка алгоритмов предобработки изображений текста в задачах распознавания / А. М. Шемяков, А. Н. Ганин // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. – 2017. – Т. 7, № 4. – С. 135–137.

91. Медведков, Н. В. Исследование метрик качества результатов инверсной фильтрации Винера для размытых и прямолинейно смазанных изображений / Н. В. Медведков, А. О. Трубаков // КОГРАФ-2021 : сборник материалов 31-й Всерос. науч.-практ. конф. по графическим информационным технологиям и системам (Нижний Новгород, 19–22 апреля 2021 г.). – Н. Новгород : Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2021. – С. 51–58.

92. Умняшкин, С. В. Применение фильтра Винера для подавления аддитивного белого шума на изображениях: сравнение частотного и вейвлет-базисов / С. В. Умняшкин, К. А. Алимагадов // Передовое развитие современной науки: опыт, проблемы, прогнозы : сборник статей II Междунар. науч.-практ. конф. (Петрозаводск, 27 декабря 2020 г.). – Петрозаводск : Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2020. – С. 21–27.

93. Панфилова, К. В. Локальная компенсация смаза изображения на основе метода Люси – Ричардсона / К. В. Панфилова // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. – 2016. – Т. 6, № 3. – С. 618–622.

94. Волосатова, Т. М. Оптимизация решения задачи восстановления изображения методом Люси – Ричардсона / Т. М. Волосатова, А. Э. Луценко, К. А. Нейман // Современная наука: теоретический и практический взгляд : сборник статей Междунар. науч.-практ. конф. : в 4 ч. (Тюмень, 15 апреля 2016 г.). – Тюмень : ООО «Аэтерна», 2016. – С. 61–65.

95. Брейкина, К. В. Оценка качества изображения при компенсации смаза по методу Люси – Ричардсона / К. В. Брейкина, С. В. Умняшкин // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 167–174.

96. Панфилова, К. В. Компенсация линейного смаза цифровых изображений с помощью метода Люси – Ричардсона / К. В. Панфилова // Графикон 2015 : труды Юбилейной 25-й Междунар. научной конф. (Протвино, 22–25 сентября 2015 г.). – Протвино : Автономная некоммерческая организация «Институт физико-технической информатики», 2015. – С. 163–167.

97. Данилина, Е. А. Оптимизация решения задачи восстановления изображения методом Тихонова / Е. А. Данилина, В. Т. Елфимов // Молодежный научно-технический вестник. – 2016. – № 2. – С. 34.

98. Шемплинер, В. В. Восстановление дефокусированных изображений методом двумерного преобразования Фурье и регуляризации Тихонова / В. В. Шемплинер // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – № 48. – С. 60–70.

99. Латахин, А. Восстановление нефокусированных изображений методом двумерного преобразования Фурье и регуляризации Тихонова / А. Латахин // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем : межвузовский сборник науч. тр. конф. (Рязань, 26–27 мая 2021 г.). – Рязань, 2021. – С. 45–48.

100. Беляева, О. В. Модификация метода устранения искажений, обусловленных вибрацией фотокамеры / О. В. Беляева, М. В. Филиппов // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2018. – № 21. – С. 27–32.

101. Захлебин, А. С. Методика построения ортофотопланов местности с помощью беспилотного квадрокоптера, оснащенного навигационным геодезическим приемником / А. С. Захлебин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2021. – Т. 24, № 3. – С. 44–49.

102. Захлебин, А. С. Верховой осмотр линий электропередач с использованием БПЛА вертолетного типа DJI phantom 4 / А. С. Захлебин // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание – 2018 : сборник материалов XIV Междунар. науч.-техн. конф. (Курск, 25–28 сентября 2018 г.). – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2018. – С. 122–124.

103. Захлебин, А. С. Метод обработки материалов аэрофотосъемки для построения геопривязанного ортофотоплана местности с телевизионной камеры беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 PRO / А. С. Захлебин // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2021. – № 4(53). – С. 26–35.

104. Захлебин, А. С. Построение ортофотоплана местности с использованием БПЛА вертолетного типа DJI PHANTOM 4 / А. С. Захлебин // Электронные средства и системы управления : материалы докладов Междунар. науч.-практ. конф. – 2018. – № 1–2. – С. 159–161.

105. Kapustin, V. Activepulse television measuring systems images space-time filtration by range / V. Kapustin, A. Movchan, M. Kuryachiy, E. Chaldina // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1488. – P. 1–6.

106. Захлебин, А. С. Комбинированный метод построения геопривязанного ортофотоплана местности по изображениям с телевизионной камеры БВС вертолетного типа / А. С. Захлебин, М. И. Курячий // Электронные средства и системы управления : материалы докладов Междунар. науч.-практ. конф. – 2021. – № 1–2. – С. 250–252.

107. Захлебин, А. С. Подсчет объема насыпи полезных ископаемых с использованием БПЛА вертолетного типа DJI Phantom 4 PRO / А. С. Захлебин // Электронные средства и системы управления : материалы докладов Междунар. науч.-практ. конф. – 2019. – № 1–2. – С. 195–196.

108. Захлебин, А. С. Подсчет объема насыпи полезных ископаемых с использованием БПЛА вертолетного типа DJI Phantom 4 PRO / А. С. Захлебин // XV Науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», 2019.

109. Захлебн, А. С. Построение геопривязанного ортофотоплана участка местности по изображениям с телевизионной камеры БПЛА вертолетного типа / А. С. Захлебн, А. Калибеков, М. И. Курячий // Электронные средства и системы управления : материалы докладов Междунар. науч.-практ. конф. – 2020. – № 1–2. – С. 187–189.

110. Журкин, И. Г. Метод свертки при трансформировании изображений / И. Г. Журкин, Ю. С. Тимофеев, Дао Кхань Хоай // Исследования земли из космоса. – 2003. – № 4. – С. 49–54.

111. Chaldina, E. S. Multi-Area Range Measurement Method Using Active-Pulse Television Measuring Systems / E. S. Chaldina, A. K. Movchan, V. V. Kapustin, M. I. Kuryachiy // 2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2020.

112. Захлебн, А. С. Построение ортофотоплана местности с использованием БПЛА вертолетного типа DJI Phantom 4 / А. С. Захлебн // Электронные средства и системы управления : материалы докладов Междунар. науч.-практ. конф. – 2018. – № 1–2. – С. 112–114.

113. Zakhlebin, A. Construction of digital terrain models for testing active-pulse television measuring systems/ A. Zakhlebin, A. Movchan, M. Kuryachiy // Journal of Physics: Conference. – Tomsk, 2021. – P. 012010.


114. Experimental assessment of the distance measurement accuracy using the active-pulse television measuring system and a digital terrain model / V. V. Kapustin, A. S. Zahlebin, A. K. Movchan, M. I. Kuryachiy, M. V. Krutikov // Компьютерная оптика. – 2022. – № 46–6.

**Приложение А
(ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)
Копии документов**



СОГЛАСОВАНО

Директор НИИ РТС ТУСУР


 19 октября 2021 г.

В.Ю.Лебелев



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям ТУСУР



А. Г. Лошилов

20 10 2021 г.

АКТ

комплексных испытаний активно-импульсной телевизионной измерительной системы (АИ ТИС) и системы построения ортофотопланов местности беспилотным воздушным судном (СПОМБВС)

Время проведения испытаний: сентябрь-октябрь 2021 г.

Состав сотрудников, проводивших испытания (выполняемые ими функции):

- 1) Крутиков М. В., с.н.с. НИИ РТС ТУСУР (обеспечение условий для проведения испытаний);
- 2) Курячий М. И., с.н.с. лаборатории ТА кафедры ТУ ТУСУР (планирование эксперимента и анализ полученных данных);
- 3) Капустин В. В., зав. лабораторией ТА кафедры ТУ ТУСУР (проведение эксперимента и анализ полученных данных с АИ ТИС);
- 4) Захлебин А. С., м.н.с. лаборатории ТА кафедры ТУ ТУСУР (проведение эксперимента и обработка полученных данных от СПОМБВС);
- 5) Мовчан А. К., м.н.с. лаборатории ТА кафедры ТУ ТУСУР (проведение эксперимента и обработка полученных данных с АИ ТИС).

Цель испытаний:

1. Экспериментальное исследование экспериментального макета АИ ТИС в полевых условиях с оценкой точности измерения дальности до объектов.
2. Экспериментальное исследование СПОМБВС в полевых условиях с оценкой точности построения ортофотоплана местности.
3. Сравнительная оценка результатов измерений дальности до объектов АИ ТИС и СПОМБВС.

Программа испытаний:

2. Проведение авиационных работ на БВС с целью получения аэрофотоснимков.
3. Камеральная обработка полученных материалов.
4. Установка на позицию первой «реперной точки» макета АИ ТИС.
5. Установка транспарантов в следующие за первой позицией «реперных точек».
6. Измерение расстояний между первой реперной точкой (позиция АИ ТИС) и каждой из следующих реперных точек (позиции транспарантов) лазерным дальномером.
7. Видеосъёмка транспарантов АИ ТИС.
8. Обработка полученных видеоданных и построение «карты глубин».

Место проведения испытаний:

Полигон НИИ РТС ТУСУР.

Состав используемой аппаратуры:

1. БВС вертолетного типа DJI Phantom 4 Pro с интегрированным геодезическим приемником AGNSS L1/L2.
2. Геодезический ГНСС приемник Trimble R8.
3. Геодезическая ГНСС базовая станция Trimble R7.
4. Экспериментальный макет АИ ТИС.
5. Персональный компьютер (ноутбук).
6. Лазерный дальномер Bosch DLE 50.

Условия проведения испытаний:

Испытания производились в полевых условиях. Исследование СПОМБВС производилось в дневное время суток. Исследование АИ ТИС производилось в вечернее время суток.

Порядок проведения испытаний:

1. Экспериментальное исследование СПОМБВС.

- 1.1 Подготовка видеокамеры.

Перед полетом производилось форматирование карты памяти видеокамеры БВС. Далее производилась настройка резкости видеокамеры. БВС поднимался на рабочую высоту, после чего производилась настройка фокуса видеокамеры и его фиксация. Настройка резкости производилась путем извлечения карты памяти и последующей проверкой качества полученного изображения. После проверки качества изображения карта памяти устанавливалась на БВС.

- 1.2 Установка наземных геодезических приемников.

Для работы использовался геодезический приемник Trimble R7 (GPS/ГЛОНАСС, двухчастотный, запись 5 раз в секунду). Приемник устанавливался на места выбранных «реперных точек». Место установки приемника должно быть открытым и не перекрывать связь со спутниками. Приемник в каждой реперной точке должен установить связь не менее чем с 12 спутниками.

1.3 Настройка бортового приемника.

Бортовой приемник (AGNSS L1/L2, GPS/ГЛОНАСС, двухчастотный, запись 5 раз в секунду). Полет осуществляется только в условиях, если бортовой приемник устанавливал связь не менее чем с 12 спутниками.

1.4 Подготовка БВС к запуску.

Для принятия решения о запуске БВС проверялись следующие параметры:

- наземная скорость ветра – не более 7 м/с;
- воздушная скорость ветра - до 10 м/с;
- освещенность – ясно, облачность, переменная облачность, без осадков, пасмурная погода;

- геодезические приемники – установлены в соответствии с описанной выше процедурой;

- оборудование исправно работает: БВС прошел предполетное тестирование и осмотр, фотокамера настроена, имеется устойчивая связь с пультом управления БВС, полетный маршрут загружен, выполненная проверка связи на всем маршруте полета;

Управление в полете. Весь полет контролируется оператором БВС, который следит за показаниями приборов и, в случае необходимости, (сильный ветер, необходимость изменения высоты, потеря связи, исполнение требований диспетчерских служб, недостаточная освещённость и т.д.) принимает решения о коррекции параметров полета и видеосъёмки.

2. Экспериментальное исследование АИ ТИС.

Первым этапом производилась точная установка макета АИ ТИС на позицию первого, ранее скоординированного геодезическим приемником «репера». Далее производилось включение системы. Осуществлялась настройка резкости и диафрагмы объектива системы. производилась настройка режима измерения дальности, относительно получаемого с системы изображения транспарантов, ранее установленных на местах, скоординированных «реперных точек». После чего осуществлялась коррекция настройки диафрагмы и резкости объектива. Далее осуществлялась запись в память персонального компьютера полученных

системой видеоданных, содержащих изображения наблюдаемого пространства. На персональном компьютере производилась обработка полученных видеоданных, построение «карты глубин» наблюдаемого пространства и дальнейшее измерение расстояния от макета АИ ТИС до каждого из транспарантов. В ходе испытаний были измерены с помощью лазерного дальномера расстояния между системой и каждым из транспарантов.

Результаты испытаний:

1. Результаты испытаний СПОМБВС.

В результате проведения испытаний СПОМБВС был получен видеоряд из аэрофотоснимков и данные спутниковых наблюдений с геодезических приборов. После фотограмметрической обработки полученных материалов был построен ортофотоплан местности с пространственным разрешением 2,4 см на пиксель. Ошибка определения координат центров «реперных точек» по ортофотоплану местности приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Ошибка на контрольных точках («реперах»)

Обозначение «репера»	Ошибка X, см	Ошибка Y, см
R1	-4,03	6,04
R2	-5,11	4,39
R3	-2,83	5,17
R4	-2,95	4,94
R5	-2,05	6,74

Расстояния, измеренные между «реперами» по построенному ортофотоплану местности, а также с помощью геодезического приемника, и разность их измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результат измерения расстояний между «реперами»

Интервал	Расстояние по ортофотоплану, м	Расстояние по геодезическому прибору, м	Разница расстояний, м
R1-R2	10,93	10,94	0,01
R1-R3	18,93	18,95	0,02
R1-R4	34,73	34,71	0,02
R1-R5	39,72	39,74	0,02

2. Результаты испытаний АИ ТИС.

В таблице 3 представлены результаты измерений расстояний до транспарантов макетом АИ ТИС и лазерным дальномером.

Таблица 3 – Результат измерения расстояний до транспарантов («реперов»)

Объект измерения	Средство измерения		Разность измерений АИ ТИС и лазерного дальномера, м
	АИ ТИС, м	Лазерный дальномер, м	
Транспарант 1 (R2)	11,12	11,00	+0,12
Транспарант 2 (R3)	18,5	19,06	+0,12
Транспарант 3 (R4)	34,78	34,97	-0,19
Транспарант 4 (R5)	39,62	39,95	-0,33


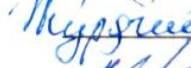



Выводы:

1. Испытания СПОМБВС показали, что используемый в данном случае метод построения ортофотоплана местности имеет сантиметровую точность определения координат объектов на рассматриваемой местности по сравнению с образцовым геодезическим прибором.

2. Испытания АИ ТИС показали, что используемый в данной системе метод измерения дальности до объектов наблюдения и построения «карты глубин» имеет дециметровую точность измерения расстояний до объектов на рассматриваемой трассе, по сравнению с образцовым лазерным дальномером, имеющим миллиметровую точность измерения расстояний, который может считаться эталонным.

3. В общем случае проведенные комплексные испытания АИ ТИС и СПОМБВС показали состоятельность методик измерения координат и дальностей до объектов рассматриваемыми средствами.

Участники испытаний

 М. В. Крутиков
 М. И. Курячий
 В. В. Капустин
 А. С. Захлебин
 А. К. Мовчан

АКТ

использования результатов диссертационной работы Захлебина Александра Сергеевича на тему: «Методы повышения точности построения ортофотоплана местности по видеоданным с беспилотного летательного аппарата»

В 2021 году при поддержке Захлебина Александра Сергеевича и использовании разработанных им методов были проведены авиационные работы на территории Томской области и камеральная обработка полученных материалов.

Результатом работ является:

1. Проведенные авиационные работы на территории населенных пунктов в сложных условиях освещенности;
2. Полученные видеоданные с борта БПЛА и метаданные, обеспечивающие географическую привязку растров.
3. Проведена предобработка исходных изображений для устранения смаза и повышения точности географической привязки;
4. Построен ортофотоплан местности, соответствующего по точности и разрешению масштабу 1:500.

Полученные результаты авиационных работ и результаты обработки позволили в установленные сроки провести ККР.

Директор ООО «СИБГЕОПРОЕКТ»

Кушнарчук С.Ю.



АКТ

использования результатов диссертационной работы Захлебина Александра Сергеевича на тему: «Методы повышения точности построения ортофотоплана местности по видеоданным с беспилотного летательного аппарата»

В 2022 году при поддержке Захлебина Александра Сергеевича и использовании разработанных им методов проведения авиационных и камеральных работ на территории г. Томска были выполнены работы, направленные на создание цифрового двойника объекта культурного наследия.

Результатом проведенных работ является:

1. Видеоданные с борта БПЛА и метаданные, обеспечивающие точную географическую привязку модели.
2. Предобработанные изображения, обеспечивающие увеличение точности географической привязки цифровой модели местности.
3. Измеряемое плотное облако точек исследуемого объекта.
4. Ортофотоплан объекта.

Полученные результаты и результаты обработки позволили получить измеряемую 3D-модель исследуемого объекта.

Директор ООО «НПО СИБПРОЕКТАРХЕОЛОГИЯ»



АКТ

использования результатов диссертационной работы Захлебина Александра Сергеевича на тему: «Методы повышения точности построения ортофотоплана местности по видеоданным с беспилотного летательного аппарата»

Осенью 2022 года при поддержке Захлебина Александра Сергеевича и использовании разработанных им методов проведения авиационных и камеральных работ на территории Томского района выполнялись ККР линейного объекта (ЛЭП). Результаты выполненной работы:

1. Получен ортофотоплан линейного объекта с пространственным разрешением 2,78 см/пикс.
2. Уменьшена ошибка определения координат на контрольных точках в среднем до 5 см.

Полученные результаты будут использоваться при проведении комплексных кадастровых работ на исследуемом объекте.

Директор ООО «Геомастер»



Беспалов В.В.

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по научной работе и
инновациям ТУСУР

к.т.н., доцент

А.Г. Лоцилов

« » 2022 г.

АКТ

**использования результатов диссертационной работы Захлебина
Александра Сергеевича на тему: «Методы повышения точности
построения ортофотоплана местности по видеоданным с беспилотного
летательного аппарата»**

Осенью 2021 года при поддержке Захлебина Александра Сергеевича и использовании разработанных им методов проведения авиационных работ на БПЛА и камеральной обработки материалов аэрофотосъемки была получена цифровая модель полигона НИИ РТС для испытания АИ ТИС.

Результаты выполненных работ.

1. Получен ортофотоплан местности с пространственным разрешением 2,4 см/пикс.
2. Получено плотное облако точек исследуемой местности.
3. Точность геопространственных данных цифровой модели местности имеет сантиметровую погрешность измерения расстояний до объектов (0,01 м – 0,08 м) на рассматриваемой трассе.

Высокая геопространственная точность полученной цифровой модели местности дает право утверждать, что она применима для тестирования точности измерения расстояний с использованием АИ ТИС.

Использование данных результатов способствовало успешной сдаче годового отчета в рамках проекта РНФ № 21-79-10200 в ТУСУРе.

Заведующий кафедрой ТУ

Т.Р. Газизов

Руководитель проекта

РНФ №21-79-10200

В.В. Капустин

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «Земля и недвижимость»
А.М. Михайлов
«10» 10 2019г.

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
результатов диссертационной работы
Захлебина Александра Сергеевича

Я, нижеподписавшийся, директор ООО «Земля и недвижимость», подтверждаю, что в работе нашей компании использованы следующие результаты диссертационной работы Захлебина А.С.

1. Результаты аэрофотосъемки местности (ортофотоплан), с пространственным разрешением 4 см. на элемент формируемого изображения.
 2. Цифровая модель местности, построенная на основе аэрофотосъемки, представленная пространственно-временными видеорядами.
- Использование данных результатов способствовало успешному завершению работ по проекту межевания территорий.

Директор ООО «Земля и недвижимость»

А.М. Михайлов



АКТ

использования результатов диссертационной работы Захлебина Александра Сергеевича на тему: «Методы повышения точности построения ортофотоплана местности по видеоданным с беспилотного летательного аппарата»

В 2021 году при поддержке Захлебина Александра Сергеевича и использовании разработанных им методов проведения авиационных и камеральных работ на территории Томской области были выполнены комплексные кадастровые работы ряда населенных пунктов.

Результаты работ.

1. Получены видеоданные с борта БПЛА и метаданные, обеспечивающие географическую привязку растров.
2. Произведена предобработка изображений, уменьшена СКО координат на контрольных точках в среднем в 1,5 раза.
3. Построены ортофотопланы местности, соответствующие по точности и разрешению масштабу 1:500.

Полученные результаты позволят в дальнейшем проводить мероприятия, связанные с комплексными кадастровыми работами, осуществлять мониторинг земель и выполнять проектирование объектов.

Директор ООО «Экспертно-консультационный
центр «Промышленная безопасность»



Гарифуллин Д.Д.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВЕРОК СИ

Сведения о результатах поверки СИ

Регистрационный номер типа СИ	53818-13
Тип СИ	EFT M1 GNSS
Наименование типа СИ	Аппаратура геодезическая спутниковая
Заводской номер СИ	10217310
Модификация СИ	EFT M1 GNSS

Сведения о поверке

Наименование организации-поверителя	ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "ЦЕНТР ИСПЫТАНИЙ И ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ НАВГЕОТЕХ - ДИАГНОСТИКА"(ООО "ЦИПСИ НАВГЕОТЕХ - ДИАГНОСТИКА")
Условный шифр знака поверки	ГСХ
Владелец СИ	Физическое лицо
Тип поверки	Периодическая
Дата поверки СИ	21.03.2022
Поверка действительна до	20.03.2023
Наименование документа, на основании которого выполнена поверка	МИ 2408-97
СИ пригодно	Да
Номер свидетельства	С-ГСХ/21-03-2022/141700435
Знак поверки в паспорте	Нет
Знак поверки на СИ	Нет

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВЕРОК СИ

Сведения о результатах поверки СИ

Регистрационный номер типа СИ	53818-13
Тип СИ	EFT M1 GNSS
Наименование типа СИ	Аппаратура геодезическая спутниковая
Заводской номер СИ	10219851
Модификация СИ	EFT M1 GNSS

Сведения о поверке

Наименование организации-поверителя	ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "ЦЕНТР ИСПЫТАНИЙ И ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ НАВГЕОТЕХ - ДИАГНОСТИКА"(ООО "ЦИПСИ НАВГЕОТЕХ - ДИАГНОСТИКА")
Условный шифр знака поверки	ГСХ
Владелец СИ	Физическое лицо
Тип поверки	Периодическая
Дата поверки СИ	21.03.2022
Поверка действительна до	20.03.2023
Наименование документа, на основании которого выполнена поверка	МИ 2408-97
СИ пригодно	Да
Номер свидетельства	С-ГСХ/21-03-2022/141700434
Знак поверки в паспорте	Нет
Знак поверки на СИ	Нет