

На правах рукописи



Захлебин Александр Сергеевич

**Повышение точности построения ортофотоплана местности  
по видеоданным с беспилотного летательного аппарата**

Специальность 2.2.6 Оптические и оптико-электронные  
приборы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

- Научный руководитель:** **Курячий Михаил Иванович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры телевидения и управления, ТУСУР
- Официальные оппоненты:** **Тихомиров Александр Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории экологического приборостроения ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН», г. Томск;  
**Баранов Павел Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и видеотехники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)»
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ)

Защита состоится 29 декабря 2022 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУР, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР и на официальном сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/zt6pubai>

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.415.01,  
доктор физико-математических наук



А. Е. Мандель

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

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 в условиях недостаточного освещения 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. Исследования 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, H. 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 работы** – разработка методик и способа компенсации искажений на изображениях, полученных с БПЛА при различных условиях, для повышения точности географической привязки и контраста. Для ее достижения 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  $\pm 10$  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.

#### **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 при 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 РФФ № 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 5 конференциях: Междунар. науч.-практ. конф. «Распознавание 2018», г. Курск, 2018; Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2018, 2019, 2020, 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.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка сокращений, списка литературы из 114 наименований, приложение из 14 с. Общий объем диссертации составляет 139 страниц машинописного текста, включая 96 рисунков и 28 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, определены цель и задачи исследования, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту.

### **1 Методы построения ортофотоплана местности**

В подразделе 1.1 показана актуальность разработки методов построения ортофотопланов местности и повышение их географической точности. В подразделе 1.2 описаны этапы развития аэрофотосъемочных систем. В разделе 1.3 рассмотрены основные принципы выполнения подготовительных работ на местности, включая расположение и определение точных координат контрольных точек на местности инструментальным методом. Рассмотрены варианты выбора БПЛА в зависимости от типа и протяженности подстилающей поверхности, с геодезическим приемником на борту и без него. Описаны преимущества и недостатки различных типов БПЛА. Приведена блок-схема классического метода проведения авиационных работ. Описаны основные этапы проведения авиационных работ, включающие обследование территории, расположение контрольных точек на местности, создание полетного задания, авиационные работы и контроль полученного материала. В подразделе 1.4 рассмотрены основные этапы камеральной обработки результатов авиационных работ, включающие выравнивание аэрофотоснимков, построение плотного облака точек, построение карты высот и построение ортофотоплана местности. В подразделе 1.5 описаны ситуации, когда исходные материалы авиационных работ подвергаются искажениям. Это связано с искажением спутникового сигнала на геодезическом приемнике БПЛА и искажениями, вызванными недостаточно короткой выдержкой в результате проведения авиационных работ в сложных условиях, например, при недостаточной освещенности или большой скорости полета на низкой высоте. Кратко описаны основные методы восстановления искаженных изображений методом винеровской фильтрации, Люси-Ричардсона, методом Тихонова и слепой деконволюции. В подразделе 1.6 сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

### **2 Методика проведения авиационных работ**

В подразделе 2.1 представлена предлагаемая методика проведения авиационных работ на БПЛА, конечной целью которой является использование результатов в построении ортофотоплана местности, соответствующего по разрешению и точности масштабу 1:500, т.е. ошибка определения координат объектов на ортофотоплане местности составляет  $\pm 10$  см. Методика предлагается для использования на БПЛА как с геодезическим приемником, так и с автономным GPS-приемником на борту. Схема предлагаемой методики приведена на рисунке 2.1.

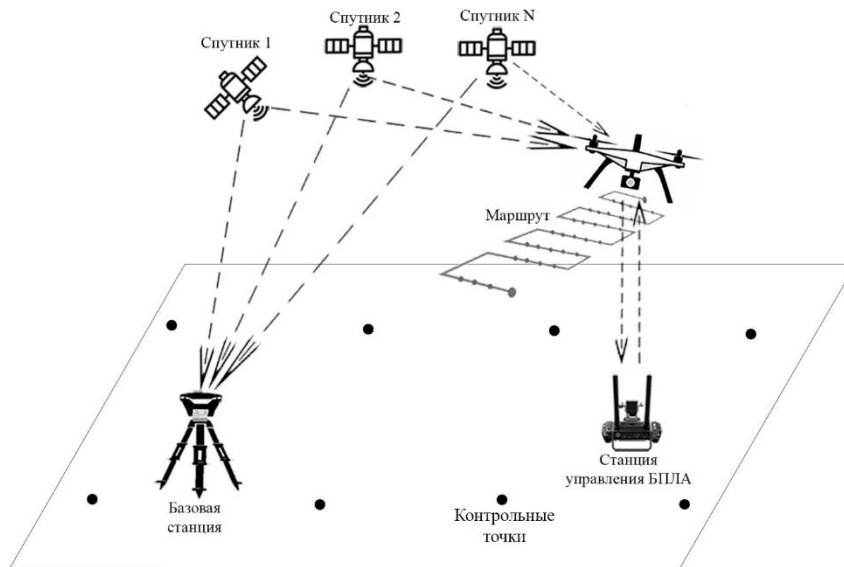


Рисунок 2.1 – Схема предлагаемой методики

В подразделе 2.2 приведена рекомендуемая схема расположения контрольных точек на местности, обеспечивающая ошибку определения координат на ортофотоплане  $\pm 10$  см вне зависимости от типа навигационного приемника на борту БПЛА. Описан способ определения координат контрольных точек на местности в режиме RTK (от англ. real time kinematic – кинематика в реальном времени) и PPK (от англ. post processing kinematic – кинематика в постобработке) с помощью геодезического оборудования. В подразделе 2.3 приведены основные параметры полетного задания, обеспечивающие максимальную производительность для БПЛА мультироторного типа, использующегося в работе при проведении эксперимента (таблица 2.1). Произведен сравнительный анализ ПО для создания и осуществления полетного задания.

Таблица 2.1 – Основные 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

В подразделе 2.4 описано используемое оборудование при проведении эксперимента. В подразделе 2.5 описана методика проведения полетного задания, а также основные настройки видеокамеры, обеспечивающие отсутствие существенных искажений при проведении авиационных работ при благоприятных условиях съемки (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Основные настройки видеокамеры

Параметр	Значение
Формат изображения	3:2
ISO	100–200
Диафрагма	2,8–8
Экспозиция	1/500–1/1600

В подразделе 2.6 описана методика осуществления проверки корректности полученных материалов, в частности проверки карты памяти БПЛА на предмет наличия аэрофотоснимков и визуальной оценки их качества.



Также проводится проверка данных спутниковых измерений по отношению сигнал/шум (ОСШ) (рисунок 2.2). Для этого с ГНСС-приемника БПЛА и с базовой станции архивируются RINEX-файлы по полемому компьютеру. Оптимальные значения ОСШ для успешной обработки данных должны находиться в пределах от 35 до 50 дБ.

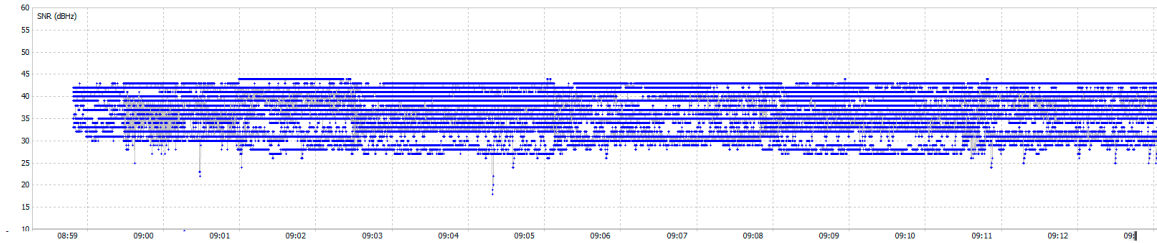


Рисунок 2.2 – График уровня отношения сигнал/шум с ГНСС-приемника БПЛА

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

В подразделе 3.1 представлена разработанная методика обработки результатов аэрофотосъемки. Технологическая схема основных этапов реализации обработки изображена на рисунке 3.1.

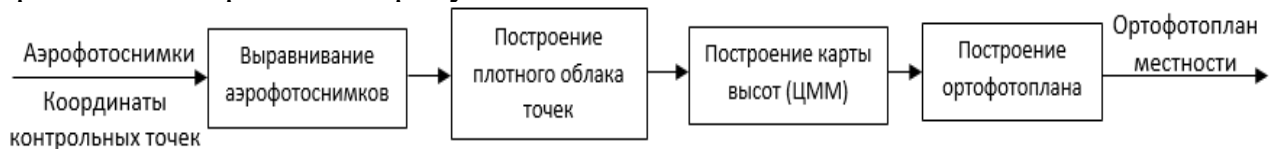


Рисунок 3.1– Технологическая схема методики обработки результатов аэрофотосъемки

В подразделе 3.2 описан первый этап - выравнивание аэрофотоснимков. Он сводится к аффинным преобразованиям соседних снимков. В результате сопоставления соседних снимков и поиска общих точек строится разреженное облако 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 3.2 изображения в этой области отмечены красным цветом.

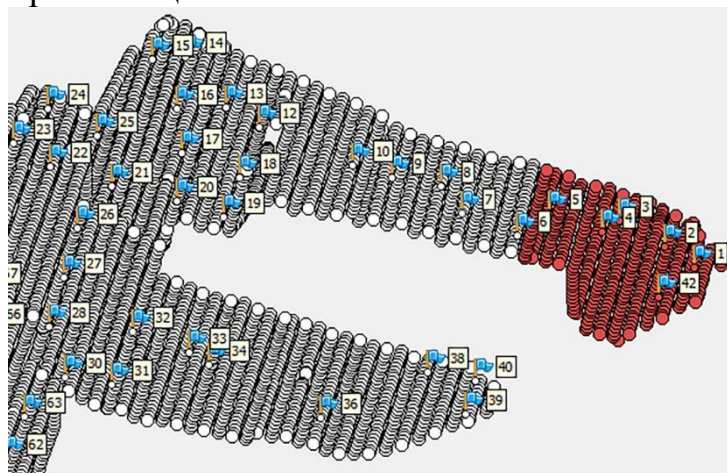


Рисунок 3.2 – Область имитации искаженного сигнала от спутников

В данной области обработка изображений происходила без точных центров фотографирования. Точность географической привязки оценивалась по 6 контрольным точкам, расположенным на этой местности. В таблице 3.2 представлена ошибка определения координат в 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 и 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 и 42 превышает 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 и 42, а в качестве проверочных – 4, 3 и 1.

Результаты оценки точности координат представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Ошибка 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
3	3,41	6,2	5,1
1	4,7	3,6	4,8

Из таблицы 3.3 следует, 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 увеличивает точность построения ортофотоплана местности до  $\pm 10$  см.

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

#### **4 Предварительная обработка изображений для повышения точности построения ортофотоплана местности**

В разделе представлено описание эксперимента, в котором были получены изображения. В общей сложности по маршруту было выполнено 13 полетных заданий, в которых скорость, высота полета и перекрытие были неизменными, а изменялось лишь время экспонирования в видеокамере (экспозиции). В таблице 4.1 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 4.1).



Рисунок 4.1– Расположение контрольных точек на местности

В результате камеральной обработки материалов аэрофотосъемки было получено 13 геопривязанных ортофотопланов местности. Была оценена ошибка в контрольных точках на ортофотопланах 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
1/100	2,7	5,3	2	2,5
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 следует, что с увеличением экспозиции, начиная со значения 1/25 с, ошибка координат в контрольных точках резко увеличивается и на местности превышает 10 см, что является критическим значением при выполнении ряда практических задач. При этом также ухудшается визуальное восприятие информации, отображенной на изображениях.

На рисунке 4.2 приведены объекты интереса на изображениях при различной экспозиции.

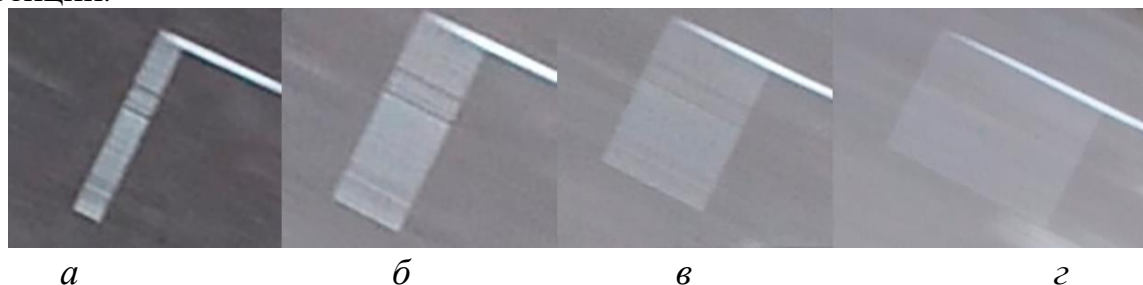


Рисунок 4.2 – Объекты интереса при различных параметрах экспозиции.

*a* – 1/25 с, *б* – 1/10 с, *в* – 1/5 с, *г* – 1/2 с

В подразделе 4.2 смоделирована и оценена функция рассеяния точки (ФРТ), которая необходима для устранения смаза. 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

Параметр	Значение
Высота полета, м	100
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, градусы	84

Размер пикселя на местности равен:

$$GSD = (S_w \cdot H \cdot 100) / (F_r \cdot mW), \quad (4.1)$$

где  $GSD$  – размер пикселя на местности, см;  $S_w$  – ширина сенсора камеры, мм;  $H$  – высота съемки, м;  $F_r$  – фокусное расстояние, мм;  $mW$  – 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:

$$S = v \cdot t, \quad (4.2)$$

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:

$$S_p = \frac{S}{GSD}, \quad (4.3)$$

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

С использованием выражений 4.2 и 4.3 вычисляется расстояние, пройденное БПЛА за время экспозиции, которое характеризует размер смаза на изображениях, а значит и вид ФРТ. Результаты расчетов представлены в таблице

Таблица 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

Таблица 4.4, можно сделать вывод, что существенная величина смаза (36 см) начинается со 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 4.3.

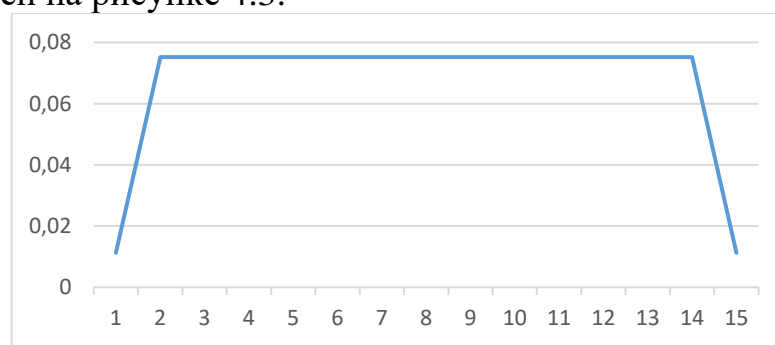


Рисунок 4.3 – Пример ФРТ для экспозиции 1/25 с

Как можно наблюдать на рисунке 4.3, количество элементов матрицы равно 15, однако 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.

В подразделе 4.3 приведены результаты моделирования и успешного устранения смаза на искусственно искаженных изображениях, что позволило повысить точность географической точности построения ортофотоплана местности и его контраст. В подразделе 4.4 были обработаны реальные изображения со смазом, 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.

На рисунке 4.4 представлен объект интереса из ортофотоплана местности, построенного по реальным изображениям со смазом.



Рисунок 4.4 – Объект интереса на ортофотоплане местности по реальным снимкам

Каждое исходное изображение восстанавливалось четырьмя различными методами. На рисунке  $\beta$   $\epsilon$   $\zeta$

Рисунок 4.5 представлены объекты интереса из ортофотопланов местности, построенных по изображениям, восстановленным различными методами.

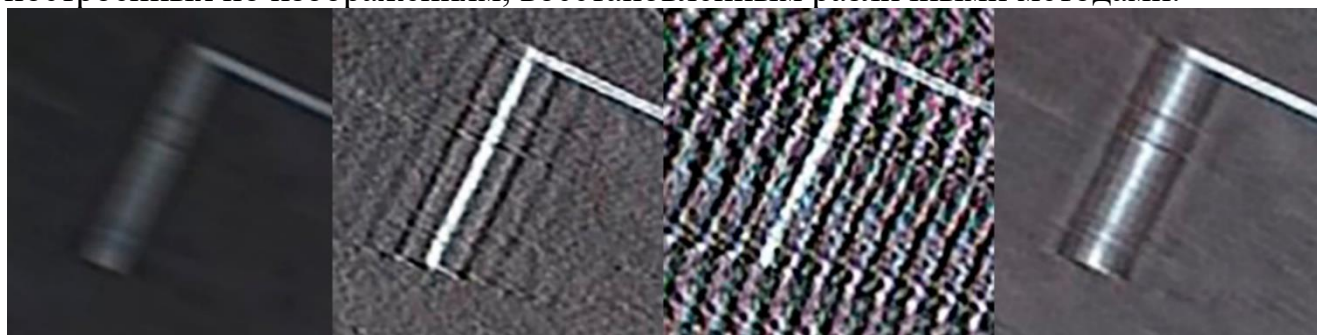


Рисунок 4.5 – Объект интереса на ортофотопланах местности, построенных по восстановленным изображениям:

$a$  – винеровская фильтрация,  $\beta$  – фильтрация Люси-Ричардсона,  $\epsilon$  – фильтрация Тихонова,  $\zeta$  – слепая деконволюция

В таблице 4.5 представлены сравнительные характеристики полученных ортофотопланов местности и объектов интереса.

Таблица 4.5 – Сравнительная характеристика яркости профиля реальных и восстановленных изображений различными методами

Характеристика	Реальные изображения	Винеровская фильтрация	Фильтрация Люси-Ричардсона	Фильтрация Тихонова	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 приведены сравнительные диаграммы, отражающие различие между основными количественными показателями полученных

ортофотопланов местности по восстановленным изображениям и исходным смазанным.

На рисунке 4.6 представлена ошибка координат в контрольных точках при различных алгоритмах фильтрации.

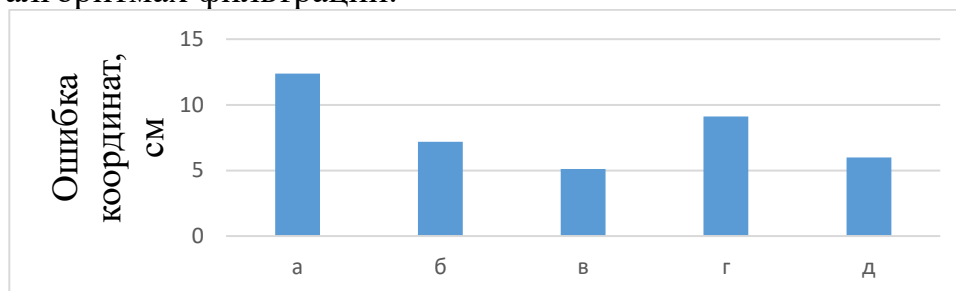


Рисунок 4.6 – Ошибка координат в контрольных точках.

*а* – реальные изображения, *б* – винеровская фильтрация, *в* – фильтрация Люси-Ричардсона, *г* – фильтрация Тихонова, *д* – слепая деконволюция

Из рисунка 4.6 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 4.7 представлена диаграмма, отражающая контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона.

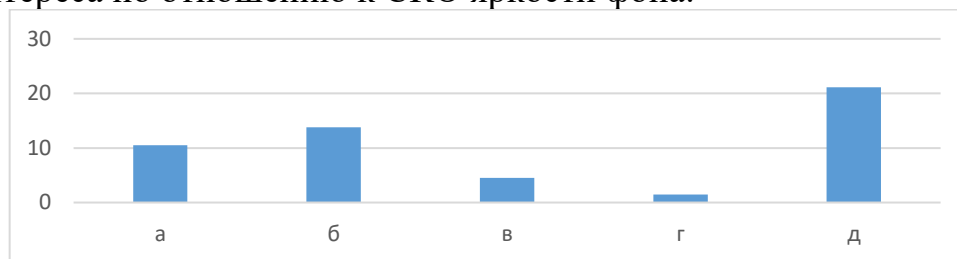


Рисунок 4.7 – Контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона.

*а* – реальные изображения, *б* – винеровская фильтрация, *в* – фильтрация Люси-Ричардсона, *г* – фильтрация Тихонова, *д* – слепая деконволюция

Из рисунка 4.7 следует, что наибольший контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона наблюдается при фильтрации методом слепой деконволюции и равен 21,1 вместо 10,51 у исходного.

На рисунке 4.8 приведено СКО яркости фона в зависимости от применяемой фильтрации.

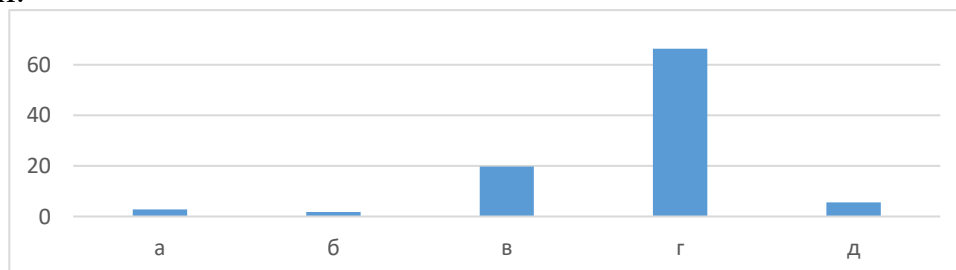


Рисунок 4.8 – СКО яркости фона

*а* – реальные изображения, *б* – винеровская фильтрация, *в* – фильтрация Люси-Ричардсона, *г* – фильтрация Тихонова, *д* – слепая деконволюция



Из рисунка 4.8 следует, что наибольшее СКО яркости фона достигается при фильтрации по методу Тихонова, что говорит о наличии ярко выраженных артефактов на восстановленных изображениях.

В подразделе 4.5 приведены основные результаты. В процессе 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 (в 2,42 раза) на восстановленном. Наибольший контраст яркости объекта интереса по отношению к СКО яркости фона наблюдался у изображений, восстановленных по методу слепой деконволюции с 10,51 до 21,1 (в 2 раза).

## **5 Экспериментальное исследование методов построения ортофотопланов**

В подразделе 5.1 рассмотрена возможность применения разработанных методик для решения практических задач при построении ортофотопланов местности по контрольным точкам. В подразделе 5.2 рассмотрена возможность применения разработанных методик для решения практических задач при построении ортофотопланов местности по точным центрам фотографирования. В подразделе 5.3 рассмотрен на практике случай взаимного применения контрольных точек и центров фотографирования для построения ортофотоплана местности по данным, содержащим искаженный сигнал от спутников. В подразделе 5.4 представлены результаты применения материалов диссертации для подсчета объема насыпи полезных ископаемых. В подразделе 5.6 показаны результаты создания цифровой модели полигона для тестирования активно-импульсной телевизионной измерительной системы, разрабатываемой на кафедре телевидения и управления ТУСУРа.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В заключении 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 в контрольных точках не превышает 10 см на местности.

3. Предложен способ определения ФРТ изображений исходя из априорной информации. В качестве такой информации выступают данные о сенсоре видеокамеры, его физических размерах, количестве пикселей и фокусном

расстоянии оптической системы. Кроме того, к априорной информации относятся высота полета БПЛА, скорость полета и время экспонирования кадра. С применением априорной информации была вычислена ФРТ каждого кадра видеоданных, которая используется при восстановлении смазанных изображений и при 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 в 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 (см. приложение А к работе).

Таким образом, в научно-квалификационной работе в соответствии со 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 разработанные методики.

2. Для увеличения точности географической привязки ортофотопланов местности, а также для уменьшения смаза на изображениях рекомендуется использовать способ определения ФРТ, который применяется для восстановления изображений, искаженных смазом.

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

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

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

1. 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.

2. 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.

### **Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022665684 Российская Федерация. Определение таксационных характеристик деревьев по ортофотоплану и цифровой модели местности / А. С. Захлебин; заявитель и правообладатель Захлебин Александр Сергеевич. – № 2022660480; заявл. 31.05.2022; опублик. 18.08.2022. – 1 с.

### **Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и WoS**

4. Construction of digital terrain models for testing active-pulse television measuring systems / A. Zakhlebin, A. Movchan, M. Kuryachiy // Journal of Physics: Conference Series: 17, Tomsk, 17–19 november 2021. – Tomsk, 2021. – P. 012010.

5. Kapustin V. V., Zahlebin A. S., Movchan A. K., Kuryachiy M. I., Krutikov M. V. Experimental assessment of the distance measurement accuracy using the active-pulse television measuring system and a digital terrain model. Computer Optics 2022; 46(6): 948–954.

### **Публикации в трудах конференций**

6. 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. Томск – 2021. – № 1–2. – С. 250–252.

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

8. 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. Томск – 2019. – № 1–2. – С. 195–196.

9. 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.

10. 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. Томск – 2018. – № 1–2. – С. 159–161.