

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



КОЗЛОВСКИЙ Александр Вячеславович

**МЕТОД, МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПРИКЛАДНОЙ
ФОТОГРАММЕТРИИ НА БАЗЕ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Мельник Эдуард Всеволодович

Таганрог – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ В ПРИКЛАДНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ.....	15
1.1 Актуальность внедрения систем обработки информации при решении задач прикладной фотограмметрии	16
1.2 Анализ методов и алгоритмов формирования изображений высокого разрешения	32
1.3 Формальное представление задачи обработки информации при формировании изображений высокого разрешения	47
1.4 Постановка цели и задач диссертационного исследования	56
Вывод к главе 1	59
ГЛАВА 2. МЕТОД ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНОГО ОБЪЕКТА.....	62
2.1 Анализ процесса обработки информации при формировании изображения высокого разрешения	64
2.1.1 Основные этапы разработанного метода.....	65
2.1.2 Процесс совмещения подкадров по ключевым точкам и дескрипторам на основе шаблона.....	69
2.1.3 Процесс уточнения совмещения с использованием анализа контуров ...	72
2.2 Формализация метода формирования изображений высокого разрешения при помощи мобильных объектов	75
2.2.1 Формализация исходного представления данных	75
2.2.2 Формирование схемы покрытия сцены и набора фрагментов	78
2.2.3 Анализ доступных ресурсов МО для оценки возможности миссии.....	80

2.2.4 Модель выбора начальной точки и запуска процесса получения фрагментов	83
2.2.5 Формирование схемы покрытия сцены фрагментами	84
2.2.6 Расчет ключевых точек и компенсация искажений	85
2.2.7 Захват изображений и их обработка на МО	90
2.2.8 Сшивка изображений по полученным распределенным кадрам	91
2.2.9 Обеспечение согласованности данных и устойчивости сшивки	96
Выводы к главе 2	98
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ГРУППАМИ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ	101
3.1 Общие принципы организации обработки информации при формировании изображений высокого разрешения группами мобильных объектов	102
3.2 Особенности распределения задач между участниками съемки	105
3.3 Определение методики обработки информации в рамках задачи формирования изображений высокого разрешения в группе мобильных объектов	109
3.4 Разработка алгоритма формирования изображений высокого разрешения	118
3.5 Доработка формализованной модели с учетом определения лидера	128
3.6 Процедура формирования фрагмента изображения высокого разрешения на одном устройстве из группы	133
Выводы к главе 3	136
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	138
4.1 Постановка задачи и методика проведения эксперимента	138
4.1.1 Методика проведения экспериментального исследования	138
4.1.2 Основные показатели качества изображений для проведения экспериментов	145

4.2 Экспериментальная проверка разработанного метода и алгоритма	147
4.3 Анализ устойчивости метода к влиянию внешних воздействий различной физической природы	150
4.3.1 Влияние шумов различной природы на работу метода	150
4.3.2 Влияние размытия и атмосферных эффектов различной природы на работу метода.....	154
4.3.3 Влияние искажений на работу метода	158
4.4 Оценка временных затрат при реализации методики и алгоритма обработки информации в задаче формирования изображений высокого разрешения	161
4.5 Сравнение предложенного способа обработки информации с нейросетевыми подходами	167
Выводы к главе 4.....	171
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	174
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	177
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	178
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	201
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	208

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности. В современном мире цифровизация в различных областях деятельности становится ключевым направлением развития, обеспечивающим повышение эффективности технологических процессов (снижение временных и материальных затрат, повышение качества результата). Одним из важнейших аспектов цифровизации является автоматизация процессов получения и анализа геометрических и семантических параметров объектов. Подобные задачи решаются с использованием систем прикладной фотограмметрии [1]. Такие системы, как правило, требуют габаритного и дорогостоящего оборудования. Этим обусловлен растущий спрос на эффективные и доступные технологии прикладной фотограмметрии, которые способны решать задачи высокоточного мониторинга, картографирования и трехмерного моделирования в условиях ограниченных ресурсов.

Поэтому актуальной является разработка методов и средств построения систем прикладной фотограмметрии на основе оборудования широкого применения с учетом временных ограничений, требований к качеству и мобильности. Это особенно важно для прикладной фотограмметрии, где требуется оперативное получение данных с высоким разрешением сразу «на местности» или «в полевых условиях». Одним из перспективных подходов к решению этой задачи является использование мобильных объектов (МО) или их групп, например смартфонов или камер, установленных на подвижные платформы, имеющих в своем составе полный комплект необходимых аппаратных средств: камеру, вычислитель, каналы связи, систему определения координат и т. д. При использовании группы МО появляется возможность объединения имеющихся ресурсов для устранения ограничений аппаратных средств отдельных устройств и повышения качества получаемых результатов. При этом требуется адаптация и интеграция результатов по таким направлениям исследований, как обработка изображений, а также распараллеливание и организация распределенной обработки информации [2,3].

Исследования в указанных выше областях нашли отражение в научных трудах отечественных и зарубежных ученых: в области обработки изображений Н.Г. Загоруйко [4], А.В. Гончарский [5], Д. С. Лебедев [6], М. М. Мирошников [7], М. М. Бонгард [8], а также Азриэль Розенфельд [9], Уильям К. Пратт [10] и Анил К. Джайн [11], в области распределенной и параллельной обработки информации А.В. Каляев [12, 13], Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. [14], И. А. Каляев [15]. И. И. Левин [16]., В. А. Павский [17], Э. И. Ватутин [18]. Э. Таненбаум [2], Ж. Тель [19], Л. Лампорт [20] и Джин Амдал [21], в области организации взаимодействия мобильных объектов в группе и мультиагентных систем: Д.А. Новиков [22], С.Н. Васильев [23], В. И. Городецкий [24], А.Р. Гайдук [25], Г. Е. Веселов [26], Лебедев Б.К. [27], В. Х. Пшихопов [28], П. О. Скобелев [29], Д.Г. Лов [30], М. Браун [31], М.А. Фитчер и Р.С. Боллес [32], Р. Зельский [33] и других.

При этом остаётся нерешённой задача применения массово выпускаемых устройств, в частности мобильных объектов, для решения задач прикладной фотографии. Для этого необходимо разработать методическое обеспечение, в том числе предполагающее интеграцию существующих подходов к обработке изображений и распределённым вычислениям с применением мобильных объектов, чтобы гарантировать требуемое качество результирующих изображений.

При этом ключевым ограничением массовых мобильных устройств является фактическая измерительная информативность получаемого изображения. Номинальное разрешение камеры не всегда соответствует числу пикселей, пригодных для метрической интерпретации, поскольку часть детализации теряется вследствие ограничений оптики, сенсора, биннинга, демозаики, шумов, смаза и программной постобработки. Поэтому в работе снижение аппаратных требований рассматривается через возможность обеспечить требуемое число информационно значимых, или «честных», пикселей результирующего изображения за счёт алгоритмической суперпозиции частично перекрывающихся фрагментов, а не за счёт применения более дорогой камеры.

Таким образом, данная диссертационная работа посвящена исследованию и разработке методического обеспечения и средств распределенной обработки информации при формировании изображений высокого разрешения в области прикладной фотограмметрии с применением мобильных объектов, с учетом их фактических характеристик.

Цель диссертационного исследования заключается в снижении аппаратных требований к отдельным устройствам при решении задач прикладной фотограмметрии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ методов и средств обработки информации при формировании изображений высокого разрешения в системах прикладной фотограмметрии.
2. Разработать метод обработки информации при формировании изображений высокого разрешения с использованием мобильного объекта.
3. Разработать методику организации обработки информации при формировании изображений высокого разрешения группами мобильных объектов.
4. Разработать алгоритм работы мобильного объекта при формировании изображений высокого разрешения в группе.
5. Провести экспериментальные исследования и показать работоспособность и эффективность полученных результатов.

Объектом исследования являются процессы обработки информации при формировании изображений высокого разрешения в системах прикладной фотограмметрии с применением мобильных объектов с ограниченными ресурсами и их групп.

Предметом исследования являются методы обработки информации при формировании изображений высокого разрешения мобильными объектами и их группами с возможностью распределенного получения, обработки и сопоставления изображений.

Методология и методы исследования основаны на использовании методов теории системного анализа, методов теории мультиагентных систем, методов теории обработки информации в распределенных вычислительных системах, теории принятия решений в группе объектов, теории параллельных вычислений, а также методов и средств обработки данных в области формирования изображений высокого разрешения, выделении характеристических точек объектов, совмещения областей, а также анализа и сравнения контуров объектов.

Научная новизна и соответствие научной специальности:

1. Разработан метод обработки информации при формировании изображений высокого разрешения, **отличающийся** использованием опорного шаблона низкого разрешения и двухэтапной процедуры совмещения частично перекрывающихся фрагментов, включающей глобальную регистрацию по ключевым точкам и последующее локальное уточнение взаимного положения фрагментов по контурам в областях перекрытия (пункт 4 паспорта специальности 2.3.1.).

2. Разработана методика организации обработки информации при формировании изображений высокого разрешения группами мобильных объектов, **отличающаяся** распараллеливанием этапа получения фрагментов высокого разрешения и их наложения на участки шаблона низкого разрешения, а также частичным распараллеливанием этапа анализа контуров (пункт 4 паспорта специальности 2.3.1.).

3. Разработан алгоритм работы мобильного объекта при формировании изображений высокого разрешения в группе, **отличающийся** сочетанием применения принципов мультиагентного взаимодействия, координации действий объектов на начальном этапе формирования изображения без последующего согласования промежуточных результатов, а также использования совокупности параметров для принятия решения о распределении ролей (пункт 5 паспорта специальности 2.3.1.).

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности **2.3.1.** Системный анализ, управление и обработка информации, статистика: п.4

(Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта) и п.5 (Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта).

Положения, выносимые на защиту

1. Метод обработки информации при формировании изображений высокого разрешения **позволяет** снизить аппаратные требования к устройствам получения и обработки данных для формирования изображений высокого разрешения за счет совмещения фрагментов целевого изображения, полученных из разных снимков на основе совмещения ключевых точек и анализа контуров.

2. Методика организации обработки информации при формировании изображений высокого разрешения группами мобильных объектов **позволяет** уменьшить время формирования изображения высокого разрешения по сравнению со случаем последовательной реализации операций, снизить нагрузку, приходящуюся на отдельные устройства, а также получать изображения динамичных сцен.

3. Алгоритм работы мобильного объекта в составе группы **позволяет** решить задачу формирования изображений высокого разрешения группой мобильных объектов на основе разработанных метода и методики.

Достоверность и обоснованность полученных автором теоретических и практических результатов подтверждается корректным использованием комбинаций методов и алгоритмов обработки информации в распределенных вычислительных системах, теории принятия решений в группе объектов, теории параллельных вычислений, а также методов и средств обработки данных в области формирования изображений высокого разрешения, выделении характеристических точек объектов, совмещения областей, а также анализа и сравнения контуров объектов.

Практическая значимость исследования определяется возможностью применения результатов в различных областях деятельности, в частности в промышленности, в строительстве, сельском хозяйстве, картографировании и других отрас-

лях, где требуется оперативное получение высококачественных изображений, и заключается в разработке алгоритма работы мобильного объекта при формировании изображений высокого разрешения, а том числе в группе, и программной модели, применение которых позволяет снизить аппаратные требования и обеспечить возможность применения мобильных объектов с ограниченными возможностями в системах прикладной фотограмметрии с целью повышения мобильности и автономности таких систем.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии теоретических основ прикладной фотограмметрии, декомпозиции данных и распределённой обработки информации за счёт: формализации процесса формирования изображений высокого разрешения на базе шаблона низкого разрешения с совмещением по ключевым точкам и контурам; разработки метода обработки информации при формировании изображений высокого разрешения с использованием мобильных объектов; построения методики организации групповой обработки данных, обеспечивающей распараллеливание этапов получения и сшивки подкадров; а также введения формальной модели выбора лидирующих ролей в группе мобильных объектов на основе совокупности критериев.

Реализация и внедрение результатов. Основные результаты диссертационного исследования получили внедрение в учебном процессе кафедры вычислительной техники ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» при подготовке студентов направления 09.03.01 Информатика и вычислительная техника, специальности 09.05.01 Применение и эксплуатация автоматизированных систем специального назначения и направления 09.04.01 Информатика и вычислительная техника. Теоретические и практические результаты диссертационной работы были внедрены в Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского ЮФУ (в ходе выполнения НИР «Разработка и реализация методологии создания цифрового двойника почв на основе искусственного интеллекта и технологии Big Data», грант РФ №25–76–31013), в НИИ МВС ЮФУ (при выполнении НИР Г30110/25-07-МВС (проект «Тема 23.6») и НКБ «МИУС» ЮФУ (в рамках реализации НИОКР «Созда-

ние технологии построения микроминиатюрной вычислительной платформы авионики для малоразмерных БЛА» (субсидия федерального бюджета № 70-2024-001125 от 20.09.2024 г.).

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: 2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Сочи, Россия, 2024; 8th Computational Methods in Systems and Software 2024, Czech Republic, 2024; XII Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика», Нижний Архыз, Россия, 2024; XIX Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления», Домбай, Россия, 2024; Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии, искусственный интеллект, большие данные: актуальные тенденции, перспективные исследования», Минск, Беларусь, 2024; XXIX Всероссийская научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в научных исследованиях НИТ-2024», Рязань, Россия, 2024; VIII, IX, X Всероссийские научно-технические конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности», Таганрог, Россия, 2022, 2023, 2024; XV Всероссийская Школа-семинар «Исследования и творческие проекты для развития и освоения проблемных и прибрежно-шельфовых зон юга России», Геленджик, Россия, 2024.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 6 статей в изданиях из перечня, утвержденного ВАК, рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в т. ч. 1 научная работа, принадлежащая лично автору; 3 статьи в научных изданиях, индексируемых международными базами данных, перечень которых определен в соответствии с рекомендациями ВАК.

Также получены 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и 1 патент на полезную модель.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту результаты и положения, составляющие основное содержание диссертационной работы, разработаны и получены лично автором или при его непосредственном участии. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит определяющая роль в развитии методического обеспечения в части обработки информации при формировании изображений высокого разрешения мобильными объектами и их группами.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 180 наименований и изложена на 214 страницах машинописного текста.

Во введении приведены цель работы, обоснование актуальности темы диссертационной работы, основные научные положения, выносимые на защиту, данные о научной новизне и практической значимости, апробации диссертационной работы, реализации и внедрении, а также приведено содержание разделов диссертации.

В первой главе диссертационной работы рассмотрены современные подходы к формированию изображений высокого разрешения в задачах прикладной фотограмметрии и проанализированы особенности их практической реализации. Анализ показал, что значительная часть известных решений предполагает централизованную обработку данных. Такая организация повышает требования к устройствам формирования изображений и ухудшает характеристики мобильности. Выявленные ограничения определили необходимость разработки метода обработки информации при формировании изображений высокого разрешения, допускающих применение группы мобильных объектов. С учётом этого сформулированы требования к распределённой обработке информации и определены критерии оценки целесообразности формирования изображений высокого разрешения группой мобильных объектов.

Во второй главе разработан метод обработки информации для формирования изображений высокого разрешения с использованием мобильных объектов. Метод включает получение исходных изображений, их совмещение по ключевым точкам и контурам, построение шаблона низкого разрешения, уточнение взаимного

положения подкадров и последовательную интеграцию фрагментов в итоговое изображение. Опорный шаблон низкого разрешения используется при определении параметров съёмки и размещении подкадров, что уменьшает влияние ошибок их позиционирования и повышает устойчивость сшивки. Математическая формализация метода охватывает исходные данные, модель формирования множества точек съёмки, компенсацию геометрических искажений, а также подготовку и передачу информации для последующей обработки. Эти положения составили теоретическую основу методики распределённой обработки информации группой мобильных объектов.

В третьей главе разработаны методика и алгоритм организации обработки информации при формировании изображений высокого разрешения группой мобильных объектов. Методика задаёт порядок распределённого выполнения операций метода: распределение ролей, получение и локальную обработку назначенных фрагментов, обмен промежуточными результатами и их последующую интеграцию. В отличие от последовательной схемы предложено параллельно получать фрагменты высокого разрешения и сопоставлять их с участками шаблона низкого разрешения; анализ контуров распараллеливается частично. За счёт этого вычислительная нагрузка распределяется между мобильными объектами, сокращается время формирования итогового изображения, а рост объёма передаваемых графических данных при увеличении числа участников группы ограничивается.

Алгоритм определяет последовательность операций, выполняемых отдельным мобильным объектом в составе группы. Независимо от назначенной роли используется единый набор операций метода, а различия между участниками задаются организационными правилами методики. Алгоритм построен с учётом принципов мультиагентного взаимодействия: автономного решения локальных задач, обмена служебной информацией, координации действий и последующей интеграции результатов. Вычислительный процесс организован по схеме с лидером, который распределяет задачи на начальном этапе, и интегратором, назначаемым лидером, который объединяет результаты после завершения локальной обработки. В главе также определены критерии выбора рационального количества мобильных

объектов с учётом параметров решаемой задачи и показано, что отсутствует существенный рост объема передаваемых данных в зависимости от числа фрагментов и устройств.

В четвертой главе представлена программная реализация метода, методики и алгоритма и описана методика экспериментальных исследований для нескольких сценариев формирования изображений высокого разрешения. Эксперименты охватывали оценку качества изображений и характеристик вычислительного процесса при различных условиях функционирования системы. Исследовалось влияние шумов, размытия и геометрических искажений, а также временные и энергетические характеристики решения. По сравнению с базовым вариантом получено улучшение метрик SSIM, PSNR, RMSE reprojection error и Seam Discontinuity Score, отмечены более устойчивое сохранение контурной структуры и меньшее количество артефактов. Экспериментальные результаты подтвердили работоспособность метода, методики и алгоритма, выполнение установленных критериев формирования изображения высокого разрешения и устойчивость к основным видам помех, рассматриваемым в работе.

В заключении обобщены результаты исследования, сформулированы итоговые выводы и обозначены направления дальнейшего развития работы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ В ПРИКЛАДНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ

Первая глава посвящена анализу современного состояния прикладной фотограмметрии и обоснованию постановки задачи исследования. Основное внимание сосредоточено на формировании изображений высокого разрешения при ограниченных аппаратных ресурсах мобильных объектов, работающих вне стационарной вычислительной инфраструктуры. Рассмотрены основные области применения прикладной фотограмметрии и требования к современным системам формирования изображений высокого разрешения. Отдельно проанализированы вопросы оперативности получения результата, устойчивости к изменению условий съёмки, производительности вычислительных средств, энергопотребления и пропускной способности каналов связи.

Структура современных фотограмметрических систем исследована по основным этапам: получение изображений, предварительная обработка, регистрация, формирование итогового изображения и выдача результата пользователю. Для каждого этапа рассмотрены особенности перехода от стационарных вычислительных комплексов к мобильным объектам с существенно меньшими вычислительными возможностями. На этой основе поставлена задача обработки информации при формировании изображений высокого разрешения по совокупности отдельных фрагментов, определены исходные данные, ожидаемые результаты, ограничения по времени, вычислительным и коммуникационным ресурсам, а также требования к качеству изображения. Проведённый анализ уточнил цель диссертационного исследования и состав задач, последовательно решаемых в последующих главах при разработке метода обработки информации, методики распределённой обработки и алгоритма работы мобильных объектов.

1.1 Актуальность внедрения систем обработки информации при решении задач прикладной фотограмметрии

Цифровизация производственной и социально-экономической деятельности сопровождается расширением автоматизированных средств получения, обработки и анализа изображений, в том числе в прикладной фотограмметрии. Особое значение имеют технологии, предназначенные для измерения геометрических параметров объектов – от промышленных конструкций до природных ресурсов.

В современной жизни системы прикладной фотограмметрии применяются в следующих сферах [34]:

- строительство и архитектура, – для 3D-моделирования зданий и сооружений, создания цифровых двойников, анализа деформаций, реконструкции исторических объектов и контроля качества строительства без прямого физического контакта;
- геодезия и картография, – для создания цифровых карт после обработки аэро- и космических снимков, формирования топографических карт, а также для создания трехмерных моделей рельефа местности, а также донного рельефа различных акваторий;
- системы мониторинга, – для моделирования и предупреждения природных катастроф в условиях естественных и искусственных изменений ландшафта, а также для создания систем наблюдения в реальном времени;
- лесное хозяйство и экология, – для учета лесных и сельскохозяйственных ресурсов, выявление незаконных вырубок, зон пожаров, отслеживания динамики лесных массивов, а также для формирования планов и прогнозов восстановления поврежденных экосистем;
- транспорт и инфраструктура, – для контроля геометрии дорожного полотна, анализа состояния дорожного покрытия, определения дефектов путей и опор мостов, анализа и оптимизации транспортного потока;

- медицина и другие биотехнологии, – для создания моделей органов пациента, исследования анатомических особенностей, протезирования на основе 3D-реконструкции;
- криминалистика и археология, – для создания моделей и панорам для судебных экспертиз, документирования артефактов и раскопок, реконструкция в виртуальном пространстве без прямого физического вмешательства и так далее.

Прикладная фотограмметрия применяется при решении широкого круга практических задач, что обусловило развитие как методов и алгоритмов обработки изображений, так и специализированных программно-аппаратных средств. Однако при переходе от лабораторных и демонстрационных условий к практической эксплуатации возрастает значение организации самого процесса обработки информации. Для мобильных комплексов, работающих в полевых условиях, существенными становятся место выполнения вычислений, распределение отдельных этапов между вычислительными узлами и связанные с этим требования к аппаратному обеспечению и времени получения результата.

Одним из вариантов решения этой задачи является распределённая обработка информации группой мобильных объектов: каждому участнику назначается часть исходных данных, обработка выполняется локально, а затем частные результаты объединяются при формировании итогового изображения. Такая организация вычислений позволяет распределить вычислительную нагрузку между мобильными объектами и уменьшить зависимость процесса обработки от наличия удаленной вычислительной инфраструктуры. Это особенно важно при выполнении работ в районах с ограниченной связностью или при полном отсутствии доступа к облачным сервисам. Так, например, при автоматизированном учете лесоматериалов отдельные мобильные объекты могут параллельно выполнять съемку различных участков штабеля, осуществлять их локальную обработку и передавать полученные результаты для последующей интеграции без привлечения центрального сервера. Такое же наблюдение можно сделать и для систем фотограмметрии, применяющихся в дефектоскопии зданий и сооружений большой площади или при обработке данных о посевах в сельском хозяйстве.

Такие методы обеспечивают высокую точность при минимальных временных и трудовых затратах [35], поскольку позволяют выполнять измерения без прямого физического контакта с объектом анализа и без развёртывания сложной аппаратной инфраструктуры.

В монографии Каляева И. А., Коробкина В.В., Мельника Э.В. и Хисамутдинова М. В. [15] описан подход к бесконтактному измерению разновысотности тепловыделяющих сборок (ТВС) в активной зоне реактора типа ВВЭР-1000, реализуемый с использованием всего одной камеры с невысоким разрешением. Особенностью данного примера является полное отсутствие подключения к интернету и необходимость выполнять измерения в режиме полной автономии, что во многом схоже с задачами, решаемыми в рамках настоящей работы.

Следует отметить, что в подобных постановках камера обычно занимает фиксированное положение относительно наблюдаемой сцены. Вследствие этого возможность повышения детализации за счет изменения точки съемки оказывается существенно ограниченной. Если размеры объекта превышают поле зрения камеры, для обеспечения его полного охвата приходится уменьшать масштаб изображения, что неизбежно приводит к снижению пространственного разрешения. В таких условиях более эффективным оказывается подход, основанный на совместной обработке серии частично перекрывающихся кадров. Каждый отдельный кадр содержит информацию лишь о фрагменте объекта, однако их последующая интеграция позволяет сохранить полный охват сцены и одновременно повысить детализацию итогового изображения за счет использования реальных наблюдений различных участков объекта.

Например, системы контроля разновысотности объектов и сооружений построены на основе простой оптико-электронной системы, не использующей дополнительные измерительные средства или телеметрическую информацию. Несмотря на сравнительно невысокое разрешение применяемой камеры, авторы демонстрируют возможность определения пространственного положения объектов с высокой

точностью. Приведенный пример представляет интерес прежде всего тем, что подтверждает возможность эффективного решения практических задач при использовании относительно простых средств получения изображений.

Общие принципы построения современных фотограмметрических систем подробно рассмотрены в ряде фундаментальных публикаций. В частности, в монографии Digital Photogrammetric Workstations [36] приведено описание архитектуры цифровых фотограмметрических рабочих станций (Digital Photogrammetric Workstations, DPW), рассмотрены основные этапы обработки данных, включая ориентирование изображений, фототриангуляцию, построение цифровых моделей рельефа и местности (DTM/DSM), формирование ортофотопланов и извлечение информативных признаков. Кроме того, в работе представлена типовая аппаратно-программная организация процесса обработки цифровых изображений, которая в течение длительного времени служила основой построения большинства фотограмметрических комплексов.

В следующей статье описана система VirtuoZo (WuDAMS/DPW) как программно-аппаратный комплекс цифровой фотограмметрии и перечислены основные функции: автоматическая внутренняя/внешняя ориентация, перенос связующих точек для АТ, стереомодель, сопоставление изображений, генерация DTM, цифровая ортофотогенерация и др. [37].

Публикация [38] систематизирует методы калибровки цифровых камер для ближней фотограмметрии и компьютерного зрения и подчёркивает, что точная калибровка/ориентация является необходимым условием извлечения метрически корректной 3D-информации. Рассматриваются подходы, включая самокалибровку на основе bundle adjustment и практические аспекты её применения. А в работе [39] предложена автоматизированная многошаговая обработка для получения true-orthophoto: ориентация изображений на базе feature-matching и уравнений коллинеарности/bundle block adjustment; dense matching; и проецирование/картографирование для формирования ортофотопланов с учётом артефактов, которая может быть интерпретирована как классическая фотограмметрическая цепочка обработки информации об изображениях.

В работе P. Patonis выполнено экспериментальное сравнение камеры мобильного устройства и доступной полнокадровой беззеркальной камеры при решении задач ближней фотограмметрии. Сравнение проводилось по уровню геометрических искажений, качеству изображений и точности определения пространственных координат. Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение полнокадровой камеры обеспечивает более высокую метрическую точность измерений. В то же время изображения, полученные с использованием мобильного устройства, характеризуются более выраженными и пространственно неоднородными искажениями, наиболее заметными в периферийных областях кадра. Вместе с этим автор работы отмечает, что мобильные устройства могут использоваться при решении фотограмметрических задач, для которых допустимо некоторое снижение точности измерений, тогда как определяющими факторами являются доступность оборудования и возможность его оперативного применения в мобильных условиях [40].

В работе Sukri S. I., Mohd Arif M. F., Razali A. F., Zainuddin K., Yusof A. R. [41] обращается внимание на то, что номинальное число мегапикселей, заявленное для камеры мобильного устройства, не соответствует эффективному разрешению формируемого изображения. Это обусловлено применением технологии pixel binning, вследствие чего итоговое разрешение кадра во многих случаях составляет 12–16 Мп.

В ГОСТ 25502–82 [42] рассматривается вопрос фотографической разрешающей способности объективов. Для определения данного показателя используются миры (радиальные или штриховые) и результат выражается в количестве элементов изображения на единицу длины, например линий на миллиметр.

Дополняют приведенные результаты материалы профессионального ресурса [43], в которых качество объективов характеризуется количественными показателями, включая резкость (Sharpness, P-Mpix), геометрические искажения (Distortion, %) и хроматические aberrации (Chromatic Aberration, μm). Представленные данные показывают, что объективы одной и той же системы могут существенно различаться по перечисленным характеристикам.

Рассмотренные работы позволяют сделать вывод о том, что качество формируемого изображения определяется не только характеристиками сенсора, но и совокупностью параметров всей оптико-электронной системы. Это обстоятельство необходимо учитывать при анализе ограничений мобильных устройств и выборе последовательности операций обработки информации. С учётом рассмотренных факторов, далее анализируется структура системы прикладной фотограмметрии, что позволяет определить место исследуемых параметров и обосновать состав операций обработки. Классическая структура системы прикладной фотограмметрии показана на Рисунке 1.1.

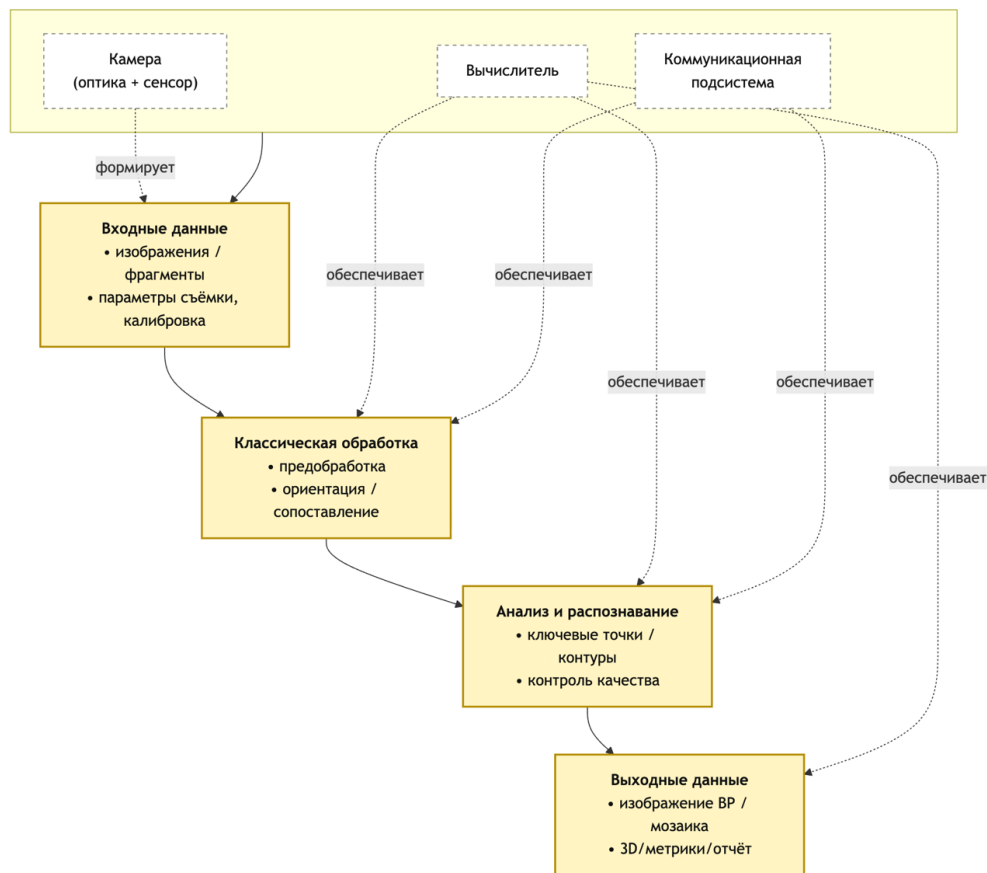


Рисунок 1.1 – Структура системы прикладной фотограмметрии

Качество формируемого изображения в значительной степени задаётся этапами получения исходных данных и их предварительной обработки (регистрации), поскольку именно здесь проявляются ограничения подсистемы «камера = оптика + сенсор». От характеристик этой подсистемы зависят устойчивость последующего совмещения кадров и возможность повышения эффективного пространственного разрешения.

Сопоставление рассмотренных примеров и структуры современных фотограмметрических систем показывает, что при близких алгоритмах и программных конвейерах предельные характеристики результата – точность восстановления геометрии сцены, детализация и устойчивость реконструкции – во многом определяются качеством исходных изображений. Поэтому при оценке подсистемы «камера = оптика + сенсор» необходимо учитывать не только номинальное разрешение сенсора в мегапикселях, но также геометрическую стабильность оптической системы, воспроизводимость параметров объектива и уровень вносимых им искажений.

Практические рекомендации по фотограмметрической съёмке предусматривают применение камер с достаточным пространственным разрешением: как правило, не менее 20 Мп, а для более требовательных задач – полнокадровых камер с разрешением порядка 30 Мп и выше. Предпочтение также отдаётся объективам с фиксированным фокусным расстоянием, обычно 35–50 мм, поскольку они характеризуются более стабильными внутренними параметрами и меньшими геометрическими искажениями. Особого внимания требует дисторсия объектива, непосредственно влияющая на точность восстановления пространственной геометрии объекта.

Вместе с тем, разрешение фотосенсора само по себе не определяет качество всей фоторегистрирующей системы. Итоговая детализация зависит и от разрешающей способности объектива, которая в оптической практике характеризуется пространственной частотой – в линиях или парах линий на миллиметр – либо эквивалентным пространственным шагом изображения. Так, для сенсора с размером пикселя 10 мкм предельная частота дискретизации составляет приблизительно 50 пар линий/мм, тогда как уменьшение размера пикселя до 4 мкм позволяет достичь значения порядка 125 пар линий/мм. Однако указанные оценки характеризуют преимущественно потенциальные возможности регистрации изображения и не отражают фактическое разрешение системы, поскольку оно определяется совокупностью характеристик оптического канала и фотоприёмного устройства.

В реальных условиях эксплуатации качество изображения ограничивается наиболее слабым элементом системы «объектив–сенсор». Даже при использовании

одной и той же цифровой камеры применение различных объективов приводит к различиям в измеряемых оптических характеристиках, включая уровень геометрических искажений, величину хроматических аберраций и интегральные показатели резкости изображения. Для высококачественных оптических систем характерна дисторсия порядка десятых долей процента, а хроматические смещения могут составлять единицы микрометров. При сравнительной оценке объективов, например, могут рассматриваться значения дисторсии около 0,5–0,6 %, хроматической аберрации порядка 10–16 мкм, а также различия в пространственной детализации и стоимости оптических компонентов.

В прикладной фотограмметрии важно разграничивать номинальное разрешение сенсора и эффективное разрешение фоторегистрирующей системы. Номинальное разрешение задаётся количеством дискретных элементов светочувствительной матрицы и характеризует потенциальный объём регистрируемой информации. Эффективное разрешение, напротив, связано с минимальным размером структурных элементов реального объекта, которые устойчиво выделяются и идентифицируются на сформированном изображении. С оптической точки зрения этот показатель определяется пространственной разрешающей способностью системы и может выражаться через предельную пространственную частоту в линиях или парах линий на миллиметр. При этом необходимо учитывать ограничение, обусловленное процессом дискретизации изображения. Если период чередования светлых и тёмных элементов оказывается меньше двух пикселей, структура не может быть корректно восстановлена сенсором вследствие нарушения условия дискретизации. В результате изображение такой структуры теряет достоверность воспроизведения, что приводит к снижению фактической разрешающей способности всей системы.

Следовательно, один пиксель имеет измерительную ценность только тогда, когда он соответствует участку объекта, несущему различимую пространственную информацию, а не является результатом применения интерполяции, демозаики, биннинга или иного программного повышения резкости.

На основании анализа описаний фотограмметрических систем и характеристик фотограмметрических устройств также можно сделать вывод, что для классического и устойчивого построения геометрии нужна «мощная и предсказуемая» оптика с малой дисторсией и достаточным пространственным разрешением сенсора.

Следует учитывать, что для современных смартфонов в случае использования одной камеры, номинальные 64/200 Мп не равны выходному разрешению из-за биннинга снимки часто сохраняются как 12–16 Мп, и это называется «оптимальным» разрешением для мобильной фотографии (даже при заявленном разрешении камеры в 200 Мп, прибор будет склеивать пиксели в группы или в «суперпиксель», например по 16 к 1). Если проанализировать оптические системы с точки зрения метрики «линии на мм», то пространственная частота (разрешение) в линиях/мм относится к сильно связанной системе «объектив + сенсор» и для малоформатных камер «в идеале» называют ~ 300 линий/мм (lp/mm). Например, при пикселе 10×10 мкм получается порядка 100 точек/мм, то есть ~ 50 пар линий/мм, а при пикселе 4 мкм получается порядка 250 точек/мм, то есть ~ 125 пар линий/мм.

Для данного класса устройств характерной особенностью является применение в сенсорах смартфонов цветового фильтра CFA (Color Filter Array), наиболее распространённым вариантом которого является схема Байера. В такой архитектуре каждый фоточувствительный элемент матрицы регистрирует только одну из цветовых компонент (R, G или B), тогда как значения остальных компонент формируются в процессе демозаики посредством интерполяционных алгоритмов. Данный подход позволяет получить полноцветное изображение, однако приводит к снижению метрической достоверности при анализе мелкомасштабных структур, особенно в областях границ объектов и участках с резкими изменениями яркости.

Дополнительное ограничение эффективного пространственного разрешения связано с использованием алгоритмов биннинга пикселей, при котором несколько соседних элементов матрицы объединяются в один виртуальный пиксель. Повышение отношения сигнал/шум при таком преобразовании сопровождается уменьшением числа независимых пространственных отсчётов изображения, что непо-

средственно ограничивает восстановление геометрически значимых деталей объекта. Поэтому в фотограмметрической обработке важны не только характеристики сенсора как регистрирующего устройства, но и сохранность геометрически корректных границ и устойчивость текстурных признаков, используемых при сопоставлении изображений. Интерполяционное восстановление цвета и встроенная программная обработка, характерные для мобильных камер, способны вносить систематические искажения локальных признаков и тем самым снижать надёжность измерительных процедур.

При оценке пригодности цифрового изображения для измерительных задач более содержательным параметром, чем абсолютное число мегапикселей, является размер проекции эффективного пикселя на объект съёмки. По физическому смыслу эта величина соответствует Ground Sampling Distance (GSD) и показывает размер участка реального объекта, представленного одним элементом изображения. От неё зависит, насколько полно цифровая модель отражает геометрические особенности исследуемого объекта. Если проекция пикселя существенно крупнее контролируемых элементов, мелкие геометрические признаки не восстанавливаются независимо от номинального разрешения матрицы. Когда же пространственный масштаб изображения соотнесён с характерным размером измеряемой детали, зарегистрированные данные приобретают непосредственную метрическую значимость.

Для контроля объектов с характерными размерами деталей (в частности, нескольких миллиметров) съёмочная конфигурация должна обеспечивать эффективный размер пикселя на объекте, соответствующий требуемой точности измерений. Его конкретное значение зависит от расстояния до объекта, параметров объектива, освещения и требований к точности восстановления геометрии.

В этом смысле под «честным пикселем» в работе понимается не номинальный пиксель сенсора, указанный производителем, а элемент изображения, удовлетворяющий трём условиям: он соответствует разрешающей способности системы «объектив + сенсор», имеет метрически интерпретируемую проекцию на объект съёмки в миллиметрах на пиксель и сохраняет контраст, достаточный для распо-

знавания, совмещения и измерения. Для практических задач фотограмметрического контроля рассматриваемый диапазон обычно составляет порядка 0,2–2 мм/пиксель. Уменьшение площади светочувствительного элемента, в свою очередь, снижает число фотонов, регистрируемых отдельным пикселем. Это ограничивает накопленный заряд, ухудшает отношение сигнал/шум и сокращает запас по динамическому диапазону. В результате слабоконтрастные границы, тонкие линии и маловыраженные текстурные элементы могут перестать формировать устойчивую пространственную структуру изображения.

В предельном случае пиксель перестаёт соответствовать отдельному элементу объекта и начинает представлять собой результат интегрального усреднения интенсивности в пределах некоторой области пространства. При этом граница или линия не фиксируется как самостоятельная геометрическая структура, а проявляется только через изменение уровня яркости соседних элементов изображения, что снижает точность последующего выделения признаков и выполнения измерительных операций. При дальнейшем уменьшении размера детали относительно пикселя такая информация может быть потеряна из-за дополнительной программной обработки.

Поэтому для фотограмметрии на базе мобильных объектов важнее не номинальное число мегапикселей, а стабильная детализация, повторяемость и измеримость признаков, а также наличие их достаточного числа, которое действительно несет в себе информацию о реальной геометрии объекта.

Для профессиональных камер, используемых в классической фотограмметрии, также важны такие характеристики, как резкость (15 P-Mpix и 19 P-Mpix по метрикам DXOMARK), дисторсия порядка 0.6% и 0.5%, хроматическая абберрация порядка 16 мкм и 10 мкм, а также конечная цена устройства и вообще целесообразность его применения в задаче.

В диссертационной работе для оценки аппаратной пригодности мобильных устройств с камерой используется показатель «честных пикселей», определенный ранее.

Такой показатель связывает физические характеристики фоторегистрирующей системы с фактической детализацией объекта исследования и позволяет перейти от оценки камеры по паспортным данным к оценке её пригодности для измерительных задач. При этом «честные пиксели» не образуют самостоятельную характеристику цифровой камеры. Показатель используется как интегральная оценка согласованности аппаратной части фоторегистрирующей системы и качества данных, поступающих на последующие этапы обработки. Иными словами, учитывается не само число элементов матрицы, а та часть изображения, которая сохраняет устойчивую связь с реальными пространственными структурами объекта и пригодна для получения метрически значимой информации.

Если одиночный кадр мобильного устройства не содержит необходимого количества информативных элементов, полнота представления объекта может быть повышена объединением нескольких частично перекрывающихся изображений. Каждый фрагмент даёт дополнительные независимые наблюдения соответствующей области сцены, а их совместная обработка повышает устойчивость восстановления пространственной информации.

Количество «честных пикселей» поэтому нельзя отождествлять с маркетинговым разрешением камеры в мегапикселях. Номинальное число элементов фото-матрицы отражает лишь потенциальный объём дискретизации, тогда как фактическая детализация формируется под совокупным влиянием оптического и цифрового трактов. Её ограничивают качество объектива, диаметр входного отверстия, дифракция, абберрации, размер пикселя, динамический диапазон сенсора, цветовая интерполяция, биннинг, шумы, смаз из-за движения и алгоритмы программной обработки.

Экспериментальным подтверждением этого положения служат исследования, в которых заявленное производителем разрешение камер мобильных устройств сопоставляется с фактической способностью воспроизводить пространственные детали с учётом оптического разрешения, передачи текстуры, цветовой информации и контраста сцены. Такие оценки показывают, что число информационно значимых элементов изображения у камер смартфонов может существенно

отличаться от номинального разрешения сенсора и в отдельных случаях быть на порядок меньше указанного производителем значения. Данное обстоятельство необходимо учитывать при оценке возможности применения мобильных устройств в задачах фотограмметрического измерения. Именно поэтому данный показатель далее используется как основа для формирования критерия аппаратных требований.

Следующая Таблица 1.1 выражает результат сравнения камер мобильных объектов различной ценовой категории и различного качества (на основе открытой документации производителей).

Таблица 1.1 – Типовые характеристики различных камер

Класс	Тип камеры	Оптика	Номинал, Мп	«Честные» Мп	Шаг пикс., мкм
Hasselblad X2 D 100C	Беззеркальная среднеформатная, BSI CMOS	зависит от объектива, байонет XCD	100	100	3.76
Nikon D850	Оптика, FF	зависит от объектива (часто 24–70/2.8)	45.7	45.7	4.35
Nikon D600	Зеркальная, FX	Зависит от объектива (часто 36×24 мм)	24,2	24	5,98
DJI Mavic 3 Pro, Hasselblad	Дрон-камера, 4/3	24 мм экв., f/2.8–f/11	20	20	~3.28
DJI Mini 2 SE	Дрон-камера, 1/2.3"	24 мм экв., f/2.8	12.5	12.5	~1.54
Samsung A10	Смартфон, Tetra²pixel	24 мм экв., f/1.9 + биннинг	12.4	~12	~1.20
Realme C67 4G	Смартфон, Quad Bayer	HM6, 1/1.67", 0.64 μm, f/1.8	108	~11	0.64

Сравнение, приведённое в Таблице 1.1, иллюстрирует, что одинаковое или даже большее номинальное разрешение не означает большей измерительной информативности изображения. Например, смартфон с заявленными 100–200 Мп может иметь эффективное число «честных» пикселей на уровне 11–12 Мп, поскольку значительная часть номинального разрешения теряется на уровне оптики, сенсора, биннинга и программной обработки. Следовательно, для решаемой задачи в области прикладной фотограмметрии следует сравнивать не паспортные мегапиксели, а количество пикселей, которые действительно участвуют в представлении информации о деталях любого объекта сцены.

Также следует учитывать, что в реальности действительную детализацию ограничивает связка объектив + сенсор + обработка + условия съёмки. Например, оптика не может физически обеспечить получение таких характеристик снимка, как указаны в документации: у смартфона очень маленькая линза, сильная асферика, большие углы лучей, абберрации и объектив может давать заметный контраст только до гораздо меньших частот, особенно по краям кадра. Как итог, сенсор часто пересэмплирует (*oversampling*) изображение, которое объектив уже «размазал», маленький пиксель делает систему чувствительной к любому расфокусу/смазу, у смартфонов почти всегда применяется слой микрофильтров над пикселями сенсора, который разделяет свет по цветам и «заявленные» X Мп дают геометрические фотодиоды, но полноцветная детализация получается после демозаики и в биннинге «честное» разрешение сильно падает, но остается ключевым параметром камеры.

Как следует из анализа, проведенного выше, современные смартфоны все же характеризуются достаточным номинальным разрешением сенсора, малым пиксельным шагом, который задаёт достаточную верхнюю границу пространственной частоты, хотя и имеют объективы с неизбежными геометрическими искажениями/абберациями, сильнее влияющими на метрическую точность, чем вычислительные ограничения. Вместе это означает, что одиночный снимок смартфона часто не обеспечивает требуемой детализации и метрической надёжности.

При этом следует учитывать, что вычислительные возможности и коммуникационные ресурсы современных смартфонов в большинстве случаев являются достаточными для выполнения операций предварительной обработки изображений, регистрации данных и передачи сопутствующих метаданных. Следовательно, дальнейшее увеличение требований к вычислительной или коммуникационной подсистеме не является определяющим фактором повышения качества фотограмметрического результата.

Основное ограничение при использовании мобильных устройств в измерительных задачах связано преимущественно с качеством исходных данных, формируемых фоторегистрирующей подсистемой. Именно характеристики камеры, включая параметры оптического тракта, сенсора и встроенных алгоритмов обработки изображения, определяют предельные возможности последующего восстановления геометрической информации объекта.

В Таблице 1.2 ниже приведено сравнение вычислительных возможностей сравниваемых устройств.

Таблица 1.2 – Вычислительные возможности некоторых мобильных устройств

Пример устройства	Платформа	CPU (ядра)	GPU	AI-ускоритель (пик), производительность
Skydio 2 / 2+	NVIDIA Jetson TX2 (Tegra X2)	6 (2×Denver2 + 4×Cortex-A57)	256-core Pascal	1.33 TFLOPS (FP16)
Qualcomm Flight RB5 / QRB5165-класс	Qualcomm Dragonwing QRB5165	8 (4×Kryo Gold + 4×Kryo Silver)	Adreno 650	~15 TOPS (AI Engine)
Samsung Galaxy A10	Samsung Exynos 7884 (14 нм)	8 ядер: 2 × Cortex-A73 (до 1,6 ГГц) + 6 × Cortex-A53 (до 1,35 ГГц)	Mali-G71 MP2. Частота: около 845–850 МГц. Количество ядер GPU: 24. Производительность: ~40,6 GFLOPS	-

Продолжение Таблицы 1.2

Realme C67 4G	Snapdragon 685	8 ядер: 4 × Cortex-A73 (до 2,8 ГГц) + 4 × Cortex-A53 (до 1,9 ГГц)	Adreno 610. Частота: 1260 МГц. Количество ядер GPU: 128. Производительность: ~322,6 GFLOPS	Hexagon 686
---------------	----------------	---	---	-------------

Таким образом, вычислительных возможностей современных смартфонов достаточно для реализации базовых этапов обработки данных в задачах прикладной фотограмметрии. При этом определяющим ограничивающим фактором является не производительность вычислительной подсистемы, а качество исходной информации, формируемой фоторегистрирующим трактом.

Снижение требований к аппаратной части мобильной фотограмметрической системы не следует сводить к увеличению номинального разрешения сенсора. Более существенный эффект может быть получен за счёт повышения объёма метрически полезной информации в изображении: применения многокадровой регистрации, увеличения перекрытия кадров, уточнения процедур совмещения и восстановления пространственной детализации объекта.

Этот подход далее выражается через критерий аппаратных требований K_{HW} , характеризующий способность фоторегистрирующей системы формировать необходимое количество информационно значимых элементов изображения («честных пикселей»), сохраняющих метрически значимые признаки объекта. При расчёте критерия учитываются не только параметры сенсора, но и способы формирования итогового изображения высокого разрешения на основе совместной обработки нескольких наблюдений.

Дальнейший анализ посвящён существующим методам и алгоритмам формирования изображений высокого разрешения, применяемым для повышения эффективности решения задач прикладной фотограмметрии.

1.2 Анализ методов и алгоритмов формирования изображений высокого разрешения

В настоящей работе формирование изображения высокого разрешения трактуется не как простое увеличение визуального масштаба, а как повышение числа элементов, содержащих достоверную информацию о пространственной структуре объекта съёмки. Поэтому оценка должна учитывать не только количество пикселей в результирующем изображении, но и сохранение метрически значимых свойств исходной сцены. Для прикладной фотограмметрии существенны пространственная локализация признаков, воспроизводимость границ объектов, устойчивость текстурных характеристик и возможность установить однозначное соответствие между размером элемента изображения и геометрическими параметрами реального объекта. С этих позиций методы формирования изображений высокого разрешения оцениваются по способности увеличивать число информационно значимых элементов («честных пикселей») и одновременно снижать аппаратные требования к устройствам фоторегистрирующей подсистемы.

Рассмотрим существующие подходы к формированию изображений высокого разрешения и получению геометрически достоверной информации в различных прикладных областях фотограмметрии.

Работа Remondino и El-Nakim представляет фундаментальный обзор методов формирования трёхмерных моделей по изображениям и рассматривает полный цикл *image-based 3D modelling*, включая проектирование геометрии съёмочной сети, калибровку и ориентацию камер, измерение поверхностей, восстановление трёхмерной геометрии, построение полигональных моделей и текстурирование. Авторы отмечают зависимость точности реконструкции от геометрии съёмочной сети, количества изображений и их разрешения. Рассматриваемый авторами подход ориентирован на классическую многокадровую фотограмметрическую реконструкцию трёхмерных изображений [44]. Lo Brutto, M., Ebolese, D. и Dardanelli, G.

[45] показывают возможности применение фотограмметрии для построения точных трехмерных моделей исторических зданий на примере монументального комплекса. Авторы в своей работе исследовали влияние параметров калибровки камер и количества наземных опорных точек на точность фотограмметрической реконструкции. Tanskanen et al. [46] предложили полный программный конвейер трёхмерной реконструкции, выполняемый непосредственно на мобильном устройстве. Основная цель исследования - обеспечить построение 3D-моделей и интерактивную обратную связь в реальном времени для программных решений. Авторы указывают, что изложенный в статье подход повышает оперативность применения фотограмметрической реконструкции в полевых условиях, однако выполнение вычислительно сложных операций непосредственно на мобильном устройстве предъявляет повышенные требования к его вычислительным ресурсам. Gonizzi Barsanti et al. [47] рассмотрели методы 3D-съемки и моделирования архитектурных объектов, относящихся к культурному наследию с использованием фотограмметрии и лазерного сканирования. Авторы статьи уделили особое внимание факторам, влияющим на полноту, точность и качество получаемых моделей. В статье также отмечается необходимость тщательного планирования съемки, выбора оборудования и параметров обработки, а также проблемы, связанные с неполнотой данных и сложностью обработки объектов подобного характера.

La Salandra et al. в работе [48] предложили фотограмметрический процесс обработки больших наборов изображений с использованием вычислительных кластеров для решения задач фотографирования и измерения протяженных объектов. Распределение наиболее ресурсоемких этапов между вычислительными узлами позволило существенно сократить время обработки. Однако в работе отмечено, что использование кластерной инфраструктуры требует наличия соответствующих вычислительных ресурсов и организации распределённого процесса обработки.

В своей работе [49] Ху с соавторами предложили модель цифрового двойника для мониторинга технического состояния зданий, объединяющую BIM-модель, трёхмерную модель реального объекта, полученную с применением фото-

грамметрии, и данные сенсоров структурного мониторинга. На примере исторического здания Nanjing Museum Old Hall авторы продемонстрировали пространственную регистрацию и интеграцию данных мониторинга с цифровой моделью, обеспечивающую возможность отслеживания текущего состояния объекта. В работе Niu с соавторами [50] предложили метод сшивки изображений БПЛА для сложных городских условий, предусматривающий адаптивное распределение ключевых точек и оптимизацию геометрической согласованности для снижения локальных искажений. Вместе с тем, метод ориентирован на съёмку специализированными устройствами и обработку большого массива изображений, что ограничивает его непосредственное применение при формировании изображений высокого разрешения с использованием мобильных устройств с ограниченными вычислительными ресурсами. Bill R. et al. [51] рассматривают применение современных геоинформационных технологий для создания городских цифровых двойников на основе интеграции разнородных пространственных данных, включая изображения, облака точек и данные дистанционного зондирования. Авторы отмечают, что большие объёмы разнородных данных, используемых для формирования и актуализации городских цифровых двойников, требуют распределённого и параллельного хранения и обработки. Вместе с тем, такой подход предполагает наличие развитой вычислительной инфраструктуры и не решает задачу обработки данных непосредственно на мобильных устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Wang et al. [52] предложили метод обнаружения и пространственного позиционирования трещин в бетонных конструкциях по изображениям, полученным с различных мобильных устройств. Метод использует коррекцию искажений, выделение характерных точек, гомографическое преобразование, сшивку изображений и построение ортоизображения для определения положения дефектов. При этом точность метода зависит от наличия опорных объектов и качества ортоизображения, а недостаток подходящих ориентиров или высокая погрешность ортоизображения могут приводить к ошибкам позиционирования. Lu et al. [53] предложили метод повышения эффективности позиционирования при визуальной SLAM-реконструкции в процессе обследования строительных объектов. Метод использует

РСА для устранения искажений траектории и аффинное преобразование, позволяющее выполнить привязку по двум опорным точкам вместо большого количества точек ручной коррекции. Эксперименты показали сокращение времени выполнения операции примерно на 50 %. Вместе с тем, необходимость использования опорных точек и последующей коррекции траектории показывает, что задача автоматической компенсации ошибок позиционирования при мобильной съёмке остаётся актуальной. Ciminello, M. et al. [54] разработали систему мониторинга технического состояния конструкции в реальном времени на основе распределённой сети сенсоров и параллельной обработки данных. Архитектура системы допускает одновременную работу нескольких алгоритмов мониторинга, а интервал обновления результатов может составлять порядка одной секунды. Вместе с тем система ориентирована на специализированные сенсорные сети с особым оборудованием и не предусматривает коррекцию ошибок позиционирования, возникающих при мобильной фотограмметрической съёмке.

Büyüktas и соавторы [55] предложили метод федеративного обучения для совместного анализа распределённых архивов данных дистанционного зондирования протяженных объектов для создания карт высот. Метод позволяет нескольким участникам совместно обучать модель без передачи исходных спутниковых изображений, используя итеративное усреднение моделей и механизмы согласования признаков представлений. Такой подход снижает необходимость централизованного хранения исходных данных, однако требует организации взаимодействия между распределёнными вычислительными узлами и дополнительных коммуникационных обменов при обучении. Perko et al. [56] предложили сквозной процесс формирования картографической продукции по стереоскопическим спутниковым изображениям высокого разрешения, включающий построение цифровых моделей поверхности и рельефа, ортотрансформирование и формирование ортофотомозаики. Авторы уделяют внимание вычислительной эффективности отдельных этапов обработки и оценивают точность получаемых результатов на различных наборах спутниковых изображений. Вместе с тем метод ориентирован на стационарную об-

работку спутниковых данных и не предусматривает динамического обновления результатов или адаптации процесса обработки информации к применению на мобильных вычислительных устройствах.

Gargari et al. [57] предложили метод проектирования трёхмерной схемы съёмки для фотограмметрического картографирования горной местности. Авторы учитывают значительные перепады высот, различия масштабов и возможные пропуски данных, влияющие на качество и точность получаемых фотограмметрических продуктов. Предварительное проектирование оптимальной траектории движения устройств позволяет повысить качество съёмки в сложном рельефе. Вместе с тем, метод предполагает предварительное планирование съёмочной сети и не предусматривает динамической коррекции параметров реконструкции в процессе обработки данных. Nex F. с соавторами [58] предложили систему оперативной фотограмметрической обработки данных мобильными объектами, предусматривающую потоковую передачу изображений и их обработку в процессе выполнения полёта. Реализованный подход позволяет получать ортофотографические материалы с минимальной задержкой и применять их для оперативного обнаружения повреждений строительных объектов. В то же время, обработка выполняется с использованием внешнего вычислительного устройства, что ограничивает возможность полностью автономной обработки непосредственно на мобильной платформе.

Jakores et al. [59] исследовали применение БПЛА-фотограмметрии для мониторинга оползней по данным, полученным в различные моменты времени. Авторы рассматривают построение плотных облаков точек, цифровых моделей рельефа и ортофотопланов и оценивают точность определения пространственных изменений поверхности. Показано, что точность результатов существенно зависит от параметров фотограмметрической съёмки и обработки данных. Bentivoglio с соавторами в работе [60] рассмотрели применение методов глубокого обучения для картографирования и моделирования зон затопления на основе данных дистанционного зондирования, цифровых моделей рельефа и других пространственных данных. Авторы отмечают необходимость больших объёмов исходных данных и вычислитель-

ных ресурсов для обучения моделей, а также ограничения, связанные с пространственным и временным разрешением спутниковых наблюдений и зависимостью от условий съёмки. Saha в своей работе [61] предложил полуобучаемый метод обнаружения изменений на основе графовой сверточной нейронной сети (GCN), предназначенный для анализа многовременных данных дистанционного зондирования. Метод использует небольшое количество размеченных данных совместно с большим объёмом неразмеченных данных, что позволяет выявлять изменения территорий при ограниченном объёме эталонных данных. Результаты экспериментов показали эффективность предложенного подхода по сравнению с рядом существующих методов обнаружения изменений. Вместе с тем применение графовой нейронной сети требует предварительного формирования графового представления данных и вычислительных ресурсов, а метод ориентирован преимущественно на постобработку данных дистанционного зондирования и не предусматривает динамической коррекции геометрических ошибок при мобильной фотограмметрической съёмке.

Авторы Chen, Liu, Zhu и другие [62] предложили комплексный подход к автоматическому обнаружению и оценке дефектов дорожного покрытия на основе UAV-съёмки и глубокого обучения. Метод включает формирование ортофотографических данных, автоматическое обнаружение трещин и классификацию дефектов покрытия. Подход ориентирован на автоматизацию обследования дорожной инфраструктуры, однако требует вычислительных ресурсов для обработки изображений и предварительной подготовки данных, так как внутри предложенного решения используются сверточные нейронные сети.

Tan и Li [63] предложили метод обнаружения дефектов дорожного покрытия на основе трёхмерной модели, сформированной по данным UAV-фотограмметрии. Полученная 3D-информация используется для выявления пространственных изменений и дефектов поверхности дороги. В тоже время, точность метода зависит от качества фотограмметрической реконструкции и характеристик исходной съёмки, что ограничивает его устойчивость при наличии ошибок реконструкции и шумов.

Li с соавторами [64] предложили метод обнаружения дефектов дорожного покрытия на основе глубокого обучения и переноса знаний между различными условиями съёмки. Авторы отмечают, что эффективность моделей существенно зависит от типа камеры, её положения и условий формирования исходных изображений, вследствие чего модель, обученная на одном наборе данных, может демонстрировать снижение качества при применении к данным, полученным в других условиях.

Litjens с другими авторами [65] представили обзор применения методов глубокого обучения для анализа медицинских изображений, охватывающий задачи классификации, обнаружения и сегментации патологий. Авторы систематизировали результаты около 300 исследований и показали высокую эффективность глубоких нейронных сетей в различных задачах медицинской диагностики. При этом применение таких методов связано с необходимостью больших объёмов размеченных данных и значительных вычислительных ресурсов.

Guo, Wang, Zhou и Patel в работе [66] предложили подход к реконструкции МР-изображений на основе федеративного обучения, позволяющий нескольким медицинским учреждениям совместно использовать преимущества распределённых наборов данных без непосредственной передачи медицинских изображений. Авторы исследовали влияние различий между учреждениями, включая используемые сенсоры и протоколы получения данных, на качество реконструкции. При этом федеративная схема требует обмена параметрами между вычислительными узлами и дополнительных коммуникационных ресурсов.

Esteva [67] продемонстрировал возможность автоматической классификации кожных поражений по фотографическим изображениям с использованием глубокой нейронной сети, показав результаты, сопоставимые с экспертами-дерматологами.

Вместе с тем, данные подходы требуют значительных вычислительных ресурсов и специализированных обучающих данных, а федеративные методы дополнительно требуют организации коммуникационного взаимодействия между распределёнными вычислительными узлами.

Также в результате проведенного анализа был получен список основных методов прикладной фотограмметрии, предложенных, модифицированных или просто применяемых в указанных выше сферах.

Чаще всего для решения задач применяются методы адаптивной сшивки изображений с обнаружением ключевых точек и границ объектов для минимизации ошибок совмещения, обработка данных при помощи группы мобильных устройств, использование нейросетей для анализа данных, а также комбинирование LiDAR и 3D-моделирование [68–70]. В статье Arias [71] рассмотрено применение гиперспектральной съёмки в земледелии, включая классификацию сельскохозяйственных культур, оценку содержания азота и хлорофилла, выявление болезней, вредителей и других факторов, влияющих на состояние растений. Авторы также отмечают высокие объёмы гиперспектральных данных и необходимость эффективных вычислительных методов их обработки.

В ряде работ [72, 73] рассматривается перенос фотограмметрической обработки в облачную инфраструктуру, позволяющий выполнять автоматическое построение ортофотопланов, цифровых моделей поверхности, трёхмерных сеток и облаков точек без использования высокопроизводительного локального оборудования. Такой подход снижает требования к вычислительным ресурсам клиентского устройства, однако предполагает передачу больших объёмов исходных данных во внешнюю вычислительную инфраструктуру.

В работах [74, 75] представлены методы, направленные на повышение измерительной достоверности за счёт привлечения дополнительной априорной и опорной информации: шаблонов, масок, контурных ограничений и механизмов обратной связи для достижения высокого качества 3D-моделей.

Методы формирования изображений высокого разрешения на основе мозаичной съёмки и построения панорам обычно предполагают регистрацию перекрывающихся изображений, полученных одной фоторегистрирующей системой с различных положений. При этом существенной задачей является определение границ объединения изображений и минимизация артефактов в областях их перекрытия. В

своей работе Zhang с соавторами [76] предложили автоматический метод оптимизации линий сшивки аэрофотоснимков на основе графовых разрезов с использованием цветовых, градиентных и высотных характеристик объектов. Основное преимущество указанных методов состоит в расширении пространственного охвата объекта и потенциальном увеличении числа отсчётов, используемых для его представления. Однако само по себе увеличение количества пикселей не означает роста метрической информативности. Ошибки пространственного совмещения, изменение освещения, движение объектов сцены и локальные геометрические искажения могут нарушить соответствие части сформированных элементов реальным участкам объекта. Номинальное разрешение при этом возрастает, тогда как число «честных пикселей», пригодных для измерительного анализа, может остаться прежним или даже уменьшиться. Поэтому изображение с высоким номинальным разрешением способно содержать искажённые либо неоднозначные области, непригодные для точного определения геометрических параметров.

В работе [77] показано, что лазерное сканирование обеспечивает высокую точность измерений, но требует дорогостоящего оборудования и значительных временных затрат. Фотограмметрические системы, основанные на анализе изображений, доступнее, однако их возможности непосредственно зависят от качества и разрешения исходных данных [78].

В работе [79] предложен алгоритм устранения размытия и недостаточной освещённости на снимках мобильного телефона. Поскольку он опирается на статистические параметры, его возможности при наличии артефактов движения ограничены; кроме того, обработка может сопровождаться искажением мелких деталей. Также этот подход, хоть и снижает шум в общем, но не учитывает нелинейные шумовые модели мобильных сенсоров, особенно в ситуации с высокой дисперсией пикселей. Кроме того, в статье предложен последовательный подход к обработке кадров, хотя отдельные статистические алгоритмы могут быть распараллелены, но это вызывает высокую нагрузку на мобильные процессоры.

В свою очередь, в статье [80] предложен нейросетевой GAN-ориентированный алгоритм, позволяющий комплексно повышать качество снимка до уровня

цифровых зеркальных камер с использованием слабого надзора (на несоответствующих парах данных). Здесь также имеются некоторые недостатки в контексте решаемой задачи. Существенной особенностью предложенного авторами метода является использование слабого обучения: для обучения не требуется наличие парно соответствующих исходных и эталонных изображений, что упрощает формирование обучающей выборки. Вместе с тем данный подход относится к методам визуального улучшения изображения и не обеспечивает гарантированного восстановления геометрически достоверной информации об объекте. Кроме того, использование глубокой GAN-архитектуры увеличивает вычислительную сложность обработки, что необходимо учитывать при реализации подобных методов на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Повышению качества снимков высокого разрешения посвящена работа [81], в которой предлагается подход мозаичного смещения снимков, сделанных устройствами различного типа. В контексте решаемой задачи, совмещение изображений с бортовых камер и аэрофотоснимков с различным ракурсом приводит к появлению геометрических артефактов из-за различных углов обзора и разрешений камер, а наличие движущихся объектов создает конфликты данных, фантомные объекты и размытия, которые никак не обрабатываются в предложенном подходе. Кроме того, алгоритм изначально последовательный и не подразумевает распараллеливания на высоком уровне.

Обработка и улучшение снимков любого вида рассматривается авторами в работе [82], в которой предлагается алгоритм повышения разрешения гиперспектрального изображения, основанный на спектральном несмешивании, для слияния многоспектрального изображения с высоким пространственным разрешением и изображения с низким пространственным разрешением. Однако, точность представленного метода сильно зависит от корректности оценки спектральных компонент и их пространственного распределения, нелинейные эффекты непременно приводят к спектральным искажениям и артефактам. Кроме того, алгоритм требует решения задач оптимизации для спектрального размешивания и пространственной реконструкции, что делает его ресурсоемким.

Известны также работы, посвященные вопросам повышения отдельных свойств снимка: разрешение, экспозиция, резкость и размытие и пр. за счет совмещения снимков с имеющимися в базе данных и вычисления на основе полученного совмещения нового изображения [83].

В отличие от методов, направленных на обработку готового снимка, в работе [84] рассматривается метод, позволяющий пользователю за счет интерактивных подсказок по управлению камерой получить более качественный снимок. Однако такой метод может быть применим только для систем, где участвует «человек-оператор».

В работе [85] предложен подход к получению снимков высокого разрешения с помощью камеры мобильного телефона. Основным отличием предложенного подхода от известных алгоритмов панорамной съемки является использование слоев-масок, получаемых из снимка общего плана измеряемого объекта. Слои-маски позволяют точнее позиционировать телефон, сохраняя не только крайние точки фотографий частей объекта при их склеивании, но также и пропорции объекта, что позволяет избежать известных искажений, присущих панорамным снимкам.

Данный подход важен для настоящей работы, поскольку он фактически переводит задачу повышения разрешения из области простого увеличения изображения в область управляемого накопления информации об объекте. Шаблон общего плана задаёт систему координат и обеспечивает связь между отдельными подкадрами, а детальные фрагменты повышают количество пикселей, приходящихся на значимые участки объекта. Тем самым увеличивается не только размер итогового изображения, но и детализация представления объекта, то есть число пикселей, несущих полезную информацию о его форме, границах и геометрических параметрах.

Результаты детальной проработки метода фотограмметрического измерения геометрических параметров объектов, инвариантного к фоторегистрирующим устройствам представлены в статьях [86, 87]. Предложена методика подготовки исходных данных, в которой предлагается способ повышения разрешения изображе-

ний для прикладной фотограмметрии, основанный на адаптивной сшивке подкадров с использованием шаблона низкого разрешения на основе сетки, подготавливаемой с помощью человека-оператора.

Существующие методы повышения пространственного разрешения целесообразно разделить на три основных группы. Первая группа повышает визуальное качество изображения, но не всегда гарантирует появление новой метрически достоверной информации об объекте. К ней относятся многие нейросетевые методы апскейлинга, подавления шума и восстановления текстур, при этом ограничивающим фактором является то, что синтезированная детализация не всегда имеет метрически достоверное происхождение и потому не может автоматически учитываться как увеличение числа «честных пикселей».

Вторая группа повышает пространственное покрытие сцены за счёт объединения нескольких кадров или фрагментов, однако требует высокой точности регистрации и контроля локальных искажений. Третья группа включает методы формирования изображений высокого разрешения на основе применения дополнительной опорной информации: шаблонов, масок, контурных ограничений и механизмов обратной связи.

В отличие от первой группы, методы второй и третьей групп вместо интерполяционного увеличения или синтеза новых деталей используют дополнительные наблюдения реального объекта. Детальность повышается за счёт увеличения объёма фактически зарегистрированной информации. Для прикладной фотограмметрии методы данных групп представляют наибольший интерес, поскольку при корректной регистрации фрагментов сохраняется пространственное соответствие между элементами изображения и участками реальной сцены, поэтому в настоящей работе предлагается применение сочетания указанных методов.

При такой постановке каждый фрагмент вносит в результирующее изображение не только дополнительные пиксели, но и дополнительные реальные измерения локальных участков сцены. Поэтому эффективность метода оценивается не по номинальному размеру итоговой мозаики, а по тому, насколько возрастает число пикселей, сохраняющих метрическую связь с объектом съёмки.

Кроме того, следует отметить, что существуют нейросетевые методы обработки информации, относящиеся ко всем трем группам. Проведенный анализ показал, что наиболее популярными или применимыми из них являются SwinIR [88], EDSR [89], ESRGAN [90] или Real-ESRGAN [91]. Кроме них существуют следующие решения:

1. End-to-end нейросети:

- Deep Image Stitching - архитектуры на базе CNN для прямой сшивки. Это обучаемые сети для сшивки, для которых продемонстрировано применение от оценивания гомографий/поля деформаций до реконструкции и устранения швов в энд-ту-энд схеме. Nie и соавторы показали пайплайн с грубым выравниванием и последующей реконструкцией [92].

- Learning-based Image Stitching - обучение на парах изображений. В данном подходе классические признаки заменяются обучаемыми блоками (выравнивание, деформации, слияние), иногда с трансформерами/нейронным блендингом [93];

- Neural Image Stitching - модели, предсказывающие параметры гомографии [94].

2. Hybrid-подходы:

- Neural Feature Matching - замена SIFT/ORB на нейросетевые дескрипторы [95];

- SuperPoint + SuperGlue - детекция и сопоставление ключевых точек, где SuperGlue - графовая сеть с self/cross-attention и дифференцируемым optimal transport для сопоставления [96];

- D2-Net - использует универсальные дескрипторы, и единую сверточную сеть CNN, которая совместно обучает детектор и дескриптор. Детекция осуществляется на поздних слоях, что повышает стабильность ключевых точек [97];

- R2D2 - реализует совместное обучение детектора/дескриптора с предсказанием «надежности» дескриптора. Здесь делается акцент на повторяемости и дискриминативности точек [98].

3. Специализированные архитектуры:

- LoFTR - Local Feature Transformer, который реализует детектор-фри сопоставление с помощью трансформеров (self/cross-attention), а также строит полуплотные соответствия в малотекстурных областях, и затем уточняет на fine-уровне [99];
- ALIKED - представляет собой адаптивный детектор с частично дифференцируемой детекцией и субпиксельной точностью. Авторы упоминают, что он предназначен для встраиваемых устройств и работы в реальном времени [100];
- QuadTree Attention - основное внимание направлено на иерархическую обработку данных с пирамидой токенов и отбором областей интереса, что снижает сложность вычислений с квадратичной до близкой к линейной [101];
- Siamese Networks - авторами представлена двуузловая архитектура с общими весами для сравнения изображений/патчей для обучения и сопоставления пар изображений [102].

4. Генеративные модели:

- GAN-based stitching - статья показывает применение GAN для устранения швов/экспозиционных сдвигов и фузии на границах стыков. В исследованиях авторов встречаются многостадийные схемы выравнивания и генеративного сглаживания [103];
- StyleGAN для заполнения - в работе описывается процесс синтеза недостающих частей изображений, а также описывается стилевой генератор с управляемыми латентными «стилями» [104];
- Diffusion models - в работе описываются диффузионные модели для сшивки, сэмплинг через обращение марковского зашумления. В настоящее время эта модель - основа SOTA-генерации/редактирования изображений [105].

5. Transformer-based:

- Vision Transformers - работа показывает применение трансформеров к изображениям через токенизацию патчей. Представленный авторами результат выглядит как мощная альтернатива CNN для экстракции признаков/сопоставления [106];

- Cross-attention механизмы - показывает использование ключевого блока трансформеров для сопоставления информации между двумя потоками (например, парой изображений) [107].

На основе вышесказанного, можно сделать вывод о многообразии методов, которые потенциально могут быть полезны в рамках данной работы. В этих условиях целесообразно опираться на структурированное представление знаний о применимости методов, их входных/выходных данных, ограничениях и ресурсных требованиях, что снижает зависимость от экспертного выбора и создаёт основу для последующей формализации критериев выбора и адаптации вычислительного процесса под конкретные условия съёмки и доступные ресурсы [108–112]. Онтология в данном контексте выступает как форма организации таких знаний и метаданных о методах и их взаимосвязях.

Эффективность онтологического подхода в системах прикладной фотограмметрии отмечается в ряде работ: в [112] – для управления знаниями о 3D-данных и процессах фотограмметрии в ГИС-среде (в т.ч. при исследованиях археологических объектов), в [113] – для формализации экспертных знаний и повышения точности классификации объектов на спутниковых и аэрофотоснимках, в [114] – для описания фотограмметрических методов и их комбинаций с целью автоматизации выбора алгоритмов и параметров при определении геометрических характеристик объектов на цифровых изображениях.

Проведенный анализ существующих решений и подходов позволил установить, что для конечного решения должен быть выполнен акцент на следующие аспекты:

- сшивку с шаблоном низкого разрешения для точного масштабирования и позиционирования фрагментов относительно шаблона и друг друга;
- минимизацию временных затрат, как на формирование изображения в целом, так и на время получения или захвата отдельных фрагментов.

В части второго аспекта использование группы мобильных объектов в качестве распределённой фоторегистрирующей и вычислительной системы позволяет перераспределить основные операции получения и предварительной обработки

данных между несколькими вычислительными узлами. Распределение вычислений между устройствами снижает нагрузку на отдельный мобильный объект при сохранении ограничений по производительности, энергопотреблению и доступному объёму памяти. Особенно заметно преимущество такой архитектуры в удалённых районах и полевых условиях, где применение производительных вычислительных комплексов ограничивается требованиями к автономности, стоимости и мобильности оборудования. Использование доступных мобильных вычислителей в этом случае даёт возможность получить приемлемое качество результата без обязательного применения специализированной аппаратуры.

Распределённая обработка внутри локальной группы с замкнутым контуром управления одновременно уменьшает зависимость от внешней вычислительной инфраструктуры. Передача исходных изображений за пределы локального сегмента ограничивается, что снижает требования к каналам связи и повышает защищённость обрабатываемой информации [115].

1.3 Формальное представление задачи обработки информации при формировании изображений высокого разрешения

Обработка изображений высокого разрешения в рассматриваемой постановке выполняется в распределённой среде – одним мобильным объектом или группой мобильных объектов – и зависит от условий съёмки, характеристик камеры, вычислительных ресурсов, ограничений связи и энергетического запаса. Поэтому для дальнейшей формализации необходимо зафиксировать контекст выполнения операций. Он объединяет сведения о наблюдаемых объектах, участвующих агентах (устройствах), допустимых операциях, доступных ресурсах и метриках результата. Такое представление позволяет описывать требования и выбирать операции обработки в пределах единого вычислительного процесса. В рамках онтологического подхода контекст задаётся как:

$$M^{sys} = \langle \mathcal{O}, \mathcal{A}, \mathcal{P}, R, \mathcal{M} \rangle. \quad (1.1)$$

В рамках настоящей работы множества имеют следующую декларативную форму описания:

- $\mathcal{O}$ – соответствует объекту/сцене и её фрагментам (подкадрам) и может быть определено как множество объектов типа шаблона низкого разрешения I^{LR} , результирующего изображения высокого разрешения I^{HR} и его фрагментов $\{I_i^{HR}\}_{i=1}^n$, а также целевой области сцены Ω_{tar} и области покрытия фрагментов $\{\Omega_i\}_{i=1}^n$ как $\mathcal{O} = \{I^{LR}, I^{HR}, \{I_i^{HR}\}_{i=1}^n, \Omega_{tar}, \{\Omega_i\}_{i=1}^n\}$;
- $\mathcal{A}$ – определяет множество мобильных объектов (или один объект в предельном случае вырожденной группы), где у каждого объекта свои характеристики Θ_k , роль r_k и состояние s_k , то есть $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ где $a_k = \langle \Theta_k, r_k, s_k \rangle$;
- $\mathcal{P}$ – задает организованный процесс, состоящий из операций конвейера формирования изображения включая формирование опорного шаблона, построение схемы покрытия сцены, получение фрагментов, предварительную обработку, выделение ключевых точек и контуров, оценку геометрических преобразований, регистрацию, локальное уточнение, сшивку и контроль качества результата;
- R – соответствует ограничениям фоторегистрирующей подсистемы, вычислениям, каналу связи, энергопотреблению и времени работы как множеству $\langle R_{cam}, R_{comp}, R_{com}, R_{en}, R_{time} \rangle$;
- $\mathcal{M}$ – определяет метрики качества и эффективности (например, SSIM/PSNR, время обработки, объём передаваемых данных, энергозатраты), то есть $\mathcal{M} = \langle M_1, \dots, M_q \rangle$, в то же самое время определяются требуемые уровни качества $\mathcal{M}^{req} = \{M_1^{req}, \dots, M_q^{req}\}$ для решения задачи. Список конкретных метрик качества для предлагаемого решения приводится в разделе 4.1.2.

Такое описание не подменяет математическую модель обработки, а задаёт пространство для обоснования того, почему и при каких ограничениях выбираются те или иные операции и как согласуется их выполнение в распределённой архитектуре, и каждая операция выбирается и параметризуется с учётом текущего контекста и ресурсных ограничений как отдельная конфигурация процесса обработки

$\mathcal{P}^* = \Phi(\mathcal{O}, \mathcal{A}, \mathcal{R}, \mathcal{M}^{req})$ для запуска процесса обработки данных $\mathcal{P}$ с учетом имеющихся ресурсов и требуемых значений показателей качества $\mathcal{M}^{req}$.

Выделим далее ряд необходимых критериев для формализации требуемых результатов исследований.

Для начала определим критерий аппаратных требований $\mathcal{H}^{req}$ как вектор:

$$\mathcal{H}^{req} = \langle H_{cam}^{req}, H_{comp}^{req}, H_{com}^{req} \rangle, \quad (1.2)$$

где H_{cam}^{req} – требование к фоторегистрирующей подсистеме мобильного объекта, включающей сенсор, оптику и программную обработку изображения, H_{comp}^{req} – это требование к вычислителю (производительность/память), в простейшем виде – доступная вычислительная производительность и доступная память устройств, а H_{com}^{req} – это требование к каналам связи, в простейшем виде – пропускная способность и допустимая задержка

Именно поэтому в настоящей диссертационной работе компоненты типа H_{cam}^{req} выражаются через показатель «честных пикселей», то есть через эффективное число пикселей, сохраняющих метрически значимую связь с участками объекта съёмки и отражающий число информационно значимых пикселей (точек) на изображении. Такой показатель в приведенной модели учитывает не только номинальное разрешение сенсора, но и разрешающую способность оптики, шаг пикселя, размер проекции пикселя на объекте, динамический диапазон и устойчивость выделения признаков.

В рамках данной работы аппаратная экономия целевого решения достигается преимущественно в части камеры. В то же самое время влиянием H_{comp}^{req} и H_{com}^{req} можно пренебречь в силу примерно одинаковых вычислительных и сетевых возможностей современных мобильных устройств. То есть можно параметрически сравнивать устройства: при прочих равных снижение H_{cam}^{req} даёт наибольший вклад в падение K_{HW} .

Такое определение напрямую соответствует акценту диссертационной работы на оценку вычислительно-коммуникационных возможностей и аппаратных требований для мобильных объектов, так как их эффективность при применении

должна рассматриваться многокритериально (то есть как совокупность качества, времени, аппаратных требований и затрачиваемой энергии) и может быть выведена в виде критерия аппаратной обеспеченности как K_{HW} , выраженное в «честных» мегапикселях относительно используемого мобильного устройства. В этом случае K_{HW} определяется как отношение:

$$K_{HW} = \frac{N_{px,ref}^{hon}}{N_{px,k}^{hon}}, \quad (1.3)$$

где $N_{px,ref}^{hon}$ – число информационно значимых пикселей эталонной камеры, а $N_{px,k}^{hon}$ – это максимум возможных информационно значимых для k -го устройства, применяемого на практике.

В диссертационной работе в качестве эталонного устройства применяется Nikon D600 (24 «честных» мегапикселя) и мобильный объект с камерой порядка 12 «честных» мегапикселей. Тогда можно определить как $K_{HW} = \frac{24}{12} = 2$.

При этом динамика изменения $N_{px,k}^{hon}$ согласно собранным данным в Таблице 1.1 показана на Рисунке 1.2 ниже и делает возможным использование процесса минимизации показателя K_{HW} для оценки эффективности аппаратной конфигурации одного мобильного объекта или их группы – то есть $K_{HW} \rightarrow \min$ при условии работы в определенных ограничениях и с учетом достаточности качества получаемых результатов, определенных ниже.

Данный процесс можно визуализировать следующим образом (Рисунок 1.2), обработав параметры из Таблицы 1.1 и «выровняв» их по среднему показателю производительности вычислительного ядра (из Таблицы 1.2).

Так как решение поставленной задачи формирования изображений высокого разрешения на основе группы мобильных объектов может сводиться к использованию либо одного устройства, либо нескольких, то можно ввести сравнительный показатель, показывающий соотношение одного отдельного мобильного объекта с одним объектом из группы с точки зрения аппаратных требований:

$$\eta_{HW} = \frac{H_{cam}^{group}}{H_{cam}^k}, \quad (1.4)$$

такой, что для требований к камере группы устройств H_{cam}^{group} группы и H_{cam}^k одного устройства, при $\eta_{HW} < 1$ аппаратные требования в целевом решении с группой ниже, чем у одиночного мощного устройства, и наоборот.

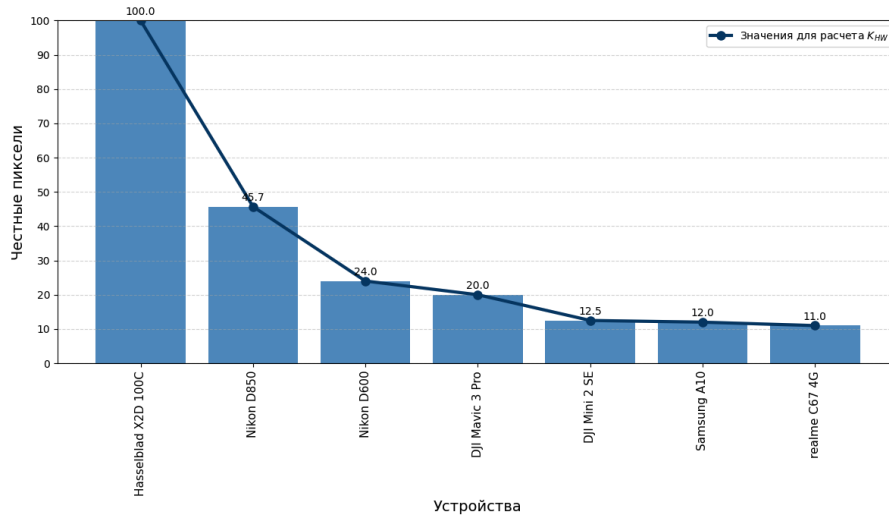


Рисунок 1.2 – Данные для расчета K_{HW} для различных устройств

С другой стороны, основная работа группы мобильных объектов при решении рассматриваемой задачи заключается в обработке и формировании изображений, которые можно интерпретировать как матрицу пикселей. Тогда решение, рассматриваемое в диссертационной работе, должно обеспечивать повышение доли полезной информации за счёт увеличения суммарного числа «эффективных» пикселей P_{eff} , получаемых группой МО (или одним МО) за один цикл алгоритма, путём алгоритмической обработки и необходимо разработать методическое обеспечение, позволяющего решать поставленную задачу без непосредственного наращивания аппаратной мощности конечных устройств.

Здесь под увеличением числа эффективных пикселей понимается не механическое увеличение размера изображения после интерполяции, а накопление дополнительных наблюдений сцены за счёт съёмки перекрывающихся фрагментов. При корректной регистрации такие фрагменты образуют суперпозицию в единой системе координат, в результате чего одна и та же область объекта может быть представлена несколькими независимыми или частично смещёнными наблюдениями с определенным процентом перекрытия и повторения информации. Это повышает

вероятность восстановления устойчивых границ, текстурных признаков и геометрически значимых деталей, то есть увеличивает число пикселей, пригодных для последующей метрической интерпретации.

Такую долю можно определить как:

$$N_{px}^{eff} \approx (1 - \bar{\rho}) \sum_{i=1}^n N_i^{hon}, \quad (1.5)$$

где N_i^{hon} – это суммарное число информационно-значимых «честных» пикселей i -го фрагмента, $\bar{\rho} \in (0,1]$ – средняя доля дублирования пикселей вследствие перекрытия. Это приближённая оценка, допустимая при сравнительно равных фрагментах, регулярной схеме покрытия и отсутствии значительных кратных перекрытий.

Тогда обосновано деление сцены на фрагменты как процесс покрытия сцены совокупностью фрагментов как:

$$\begin{cases} \Omega_{tar} \subseteq \bigcup_{i=1}^n \Omega_i, \\ \rho_{i,j} = \frac{\mu(\Omega_i \cap \Omega_j)}{\min(\mu(\Omega_i), \mu(\Omega_j))} \geq \rho_{min}, \\ \forall (i,j) \in \mathcal{E}, \end{cases} \quad (1.6)$$

где Ω_{tar} – целевая область сцены, для которой требуется сформировать результирующее изображение высокого разрешения, n – общее число фрагментов высокого разрешения, используемых для формирования результирующего изображения, $i, j \in \{1, \dots, n\}$ – индексы фрагментов, Ω_i – область сцены, покрываемая i -м фрагментом изображения высокого разрешения I_i^{HR} , $\mu(\Omega)$ – мера области Ω , определяемая в данном случае ее «пиксельной» площадью, то есть общим числом пикселей принадлежащих ей, а ρ_{min} как минимально допустимая доля перекрытия соседних фрагментов.

Параметр ρ_{min} выступает в роли предела для относительной доли перекрытия двух фрагментов, где в знаменателе используется площадь меньшего фрагмента, поэтому показатель характеризует, какая доля меньшего из двух фрагментов входит в общую область. Конкретное значение ρ_{min} должно задаваться условиями съёмки – здесь достаточно определить его как заданный порог.

$\mathcal{E}$ – множество пар соседних фрагментов, между которыми должна устанавливаться непосредственная геометрическая связь, то есть $\mathcal{E} \subseteq \{(i,j): i,j \in$

$\{1, \dots, n\}, i \neq j\}$ и условие $\forall(i, j) \in E$ означает, что требование к перекрытию предъявляется не ко всем возможным парам подкадров, а только к соседним, между которыми должна устанавливаться геометрическая связь при помощи шаблона низкого разрешения.

Важно также понимать, что здесь под I_i^{HR} понимается часть формируемого изображения высокого разрешения, то есть данные (значения яркости или цвета пикселей), а Ω_i – это некоторая область, в которой эти данные определены. Объединение областей Ω_i означает, что каждый участок целевой сцены покрыт хотя бы одним фрагментом (в случае группы мобильных объектов, вырожденной до одного устройства) и отдельные фрагменты могут частично выходить за границы целевой области.

Без пересечения предлагаемая система решения задачи не сможет:

- сопоставить признаки;
- вычислить преобразование;
- выполнить регистрацию;
- корректно сшить изображения.

И именно пересечение используется для:

- контурного совмещения;
- оценки гомографии;
- субпиксельной регистрации объектов при необходимости.

В то же время, когда результирующее изображение высокого разрешения формируется как совокупность частично перекрывающихся фрагментов сцены, можно выделить ограничение на время формирования полного изображения для *МО* как:

$$T_{form}^{(m)} = T_{cap}^{(m)} + T_{proc}^{(m)} + T_{sync}^{(m)} \leq T_{form}^{max}. \quad (1.7)$$

где $T_{form}^{(m)}$ – время формирования изображения высокого разрешения для m мобильных объектов, $T_{cap}^{(m)}$ – это время захвата подкадров, $T_{proc}^{(m)}$ – время обработки всех

подкадров, а $T_{sync}^{(m)}$ – совокупное время синхронизации m мобильных устройств. Тогда в случае наличия только одного мобильного объекта нужно учитывать, что $T_{sync}^{(1)} = 0$.

Полный цикл обработки информации считается выполнимым по времени, если оценённое или фактическое значение $T_{form}^{(m)}$ не превышает T_{form}^{max} . При этом $T_{form}^{(m)}$ включает в себя ряд компонент, которые могут выполняться параллельно в случае обработки информации группой MO .

В то же самое время при многих мобильных объектах необходимо учитывать показатель $T_{form}^{(m)} \leq T_{max}$ как условие выполнимости по времени.

Для описания времени формирования набора изображений введём длительность отдельного акта захвата подкадра. При последовательном выполнении съёмки назначенных фрагментов мобильным объектом без перекрытия операций можно определить:

$$T_{cap}^{(1)} = \max_{i \in S}(t_i^{end}) - \min_{i \in S}(t_i^{start}), \quad (1.8)$$

где t_{ki}^{start} и t_{ki}^{end} – моменты начала и окончания получения i -го фрагмента k -м мобильным объектом, а $S = \{1, \dots, n + 1\}$ – множество индексов исходных кадров, включающее номера фрагментов высокого разрешения $I_i^{HR}, i \in [1, n]$ и номер $(n + 1)$ шаблона низкого разрешения I^{LR} .

Таким образом, величина $T_{cap}^{(1)}$ характеризует не сумму времён работы мобильного объекта, а продолжительность этапа получения шаблона и подкадров, определяемую временными границами наиболее раннего начала и наиболее позднего окончания съёмки. В качестве аналога здесь можно взять время выдержки фотоаппарата в части динамичности снимаемых сцен. Данное представление используется далее при построении модели временных затрат распределённой обработки информации и конкретизируется в главе 3 при рассмотрении временной организации совместного захвата фрагментов несколькими мобильными объектами.

Тогда разложение времени обработки и связь с многоядерностью будет рассматриваться как:

$$\begin{cases} T_{proc}^{(m)} \approx \frac{\sum_{i=1}^n t_i^{reg}}{p_{eff}} + t_{blend}, \\ 1 < p_{eff} < p_{thr}, \end{cases} \quad (1.9)$$

где p_{eff} – эффективная доля параллелизма, p_{thr} – число физически доступных потоков вычислений, t_i^{reg} – время регистрации фрагмента (включает выделение признаков, оценку гомографии и контурное уточнение и так далее), а t_{blend} – финальная сшивка/слияние подкадров, то есть время итогового объединения подкадров в изображение высокого разрешения I^{HR} .

Кроме того, можно ввести условие по аппаратной экономии камеры через число доступных информационных пикселей как:

$$N_{px}^{eff} \geq N_{px,req}^{hon}, \quad (1.10)$$

где $N_{px,req}^{hon}$ – требуемое число информационно значимых пикселей для решения задачи.

Исходя из этого, выдвинутый тезис о том, что следует увеличивать не мощность и качество одной конечной камеры, а эффективное разрешение композицией, с учетом перекрытия, можно выразить через соотношение:

$$N_{px}^{eff} = \sum_{i=1}^n N_i^{hon} \cdot (1 - \rho_i^{dup}) \cdot \gamma_i, \quad (1.11)$$

где ρ_i^{dup} – это эффективная доля перекрытия i -го фрагмента с уже покрытой областью, а $\gamma_i \geq 1$ – эмпирически или алгоритмически подтверждённый коэффициент прироста эффективной информативности вследствие субпиксельных смещений и суперпозиции, что приводит нас к критерию «достаточности» как к множеству ограничений $\langle N_{px}^{eff}, T_{form}^{(m)}, T_{cap}^{(m)} \rangle$:

$$\begin{cases} N_{px}^{eff} \geq N_{px}^{req}, \\ T_{form}^{(m)} \leq T_{form}^{max}. \end{cases} \quad (1.12)$$

Следовательно, критерий достаточности задаёт переход от аппаратной логики повышения качества изображения к вычислительно-алгоритмической логике. В первом случае требуемое число «честных пикселей» достигается за счёт применения более качественной камеры, оптики и сенсора. Во втором случае тот же эф-

фект достигается за счёт формирования набора частично перекрывающихся фрагментов, их точной регистрации, учёта субпиксельных смещений и последующего объединения в результирующее изображение. Именно этот переход является основой снижения аппаратных требований в рамках диссертационной работы.

1.4 Постановка цели и задач диссертационного исследования

Результаты проведённого анализа и введённые в разделе 1.3 показатели аппаратной обеспеченности позволяют формализовать требования к системе формирования изображений высокого разрешения через интегральный критерий K_{HW} . Наибольший вклад в него вносит фоторегистрирующая подсистема, поскольку камера формирует первичную информацию о пространственных характеристиках объекта. Вычислительные и коммуникационные компоненты в большинстве практических сценариев задают прежде всего эксплуатационные ограничения – длительность обработки, энергопотребление и возможности обмена данными.

Одновременно сохраняется основное противоречие исследования: прикладная фотограмметрия требует получения метрически достоверных изображений высокого разрешения в мобильных и полевых условиях, тогда как аппаратные возможности конечного устройства ограничены. Ситуацию дополнительно усложняет зависимость от внешней вычислительной инфраструктуры, включая доступность каналов передачи данных и возможность централизованно обрабатывать значительные объёмы информации.

Указанное противоречие определяет необходимость разработки подходов, направленных на снижение требований к характеристикам отдельных мобильных устройств при сохранении заданного уровня качества и временных параметров формирования результата. Одним из перспективных направлений решения данной задачи является переход к краевым и распределённым архитектурам обработки, в

которых итоговое изображение формируется как результат управляемого объединения частичных наблюдений сцены, полученных отдельными фрагментами изображения.

В основу методического обеспечения следует положить подход, основанный на наложении фрагментов изображения повышенной детализации в виде суперпозиции подкадров на опорное (шаблонное) изображение низкого разрешения. При этом методическое обеспечение должно обеспечивать выполнение условий (1.12).

Именно при формировании изображения высокого разрешения путём суперпозиции и объединения серии кадров с перекрытием (в том числе при наличии субпиксельных смещений) удаётся повысить эффективное пространственное разрешение результирующего изображения и одновременно снизить влияние случайных шумов и артефактов. Использование нескольких наблюдений позволяет частично компенсировать ограниченную разрешающую способность одиночной мобильной камеры и обосновывает применение сравнительно недорогих смартфонов вместо профессиональных фотограмметрических камер. Однако выигрыш от субпиксельных сдвигов возможен лишь при точной регистрации кадров по точкам или пикселям. По этой причине на практике требуется анализ структуры сцены, повышающий устойчивость совмещения и уменьшающий локальные деформации. Методы такой регистрации и последующего объединения кадров рассматриваются в следующем пункте.

В дальнейшем мобильный объект трактуется прежде всего как носитель камеры и средств первичной обработки данных. В настоящем разделе рассматриваются способы получения, представления, регистрации и объединения фрагментов изображения, поскольку именно эти этапы определяют итоговое разрешение и сохранение метрической информативности. Организация вычислительного процесса, распределение задач между устройствами, маршрутизация потоков данных и обмен промежуточными результатами вынесены в последующую часть исследования.

Противоречие в практике состоит в необходимости использовать доступные фоторегистрирующие устройства и их группы в полевых условиях при ограниченных вычислительных возможностях, энергоснабжении и пропускной способности каналов связи. Это требует методов формирования высокоинформативных изображений, которые снижают требования к отдельному устройству за счёт совместной работы нескольких мобильных узлов и распределённой обработки данных.

Противоречие в теории связано с тем, что существующие основы фотограмметрии в значительной степени ориентированы на специализированные фоторегистрирующие комплексы и обработку на едином вычислительном узле. Методы и модели, учитывающие совместное применение группы мобильных устройств, неоднородность и ограниченность их аппаратных характеристик при одновременном сохранении метрической достоверности, разработаны недостаточно. Отсюда следует научная задача разработки методического обеспечения формирования изображений высокого разрешения на основе распределённого получения и обработки фрагментов. Такое обеспечение должно повышать информативность результата без пропорционального роста требований к аппаратным ресурсам каждого устройства.

Цель диссертационного исследования заключается в снижении аппаратных требований к отдельным устройствам при решении задач прикладной фотограмметрии.

Научная задача диссертационного исследования состоит в разработке методологического, методического и алгоритмического решения, позволяющего снизить аппаратные требования к отдельным устройствам при решении задач прикладной фотограмметрии.

Таким образом, для решения общей научной задачи в диссертационной работе подлежат решению следующие частные задачи исследования для реализации сформулированных критериев аппаратной обеспеченности:

1. Разработка метода обработки информации при формировании изображений высокого разрешения, который **позволит** снизить аппаратные требования к

устройствам получения и обработки данных для формирования изображений высокого разрешения за счет совмещения фрагментов целевого изображения, полученных из разных снимков на основе совмещения ключевых точек и анализа контуров.

2. Разработка методики организации обработки информации при формировании изображений высокого разрешения группами мобильных объектов, которая **позволит** уменьшить время формирования изображения высокого разрешения по сравнению со случаем последовательной реализации операций, снизить нагрузку, приходящуюся на отдельные устройства, а также получать изображения динамичных сцен.

3. Разработка алгоритма работы мобильного объекта в составе группы, который **позволит** решить задачу формирования изображений высокого разрешения группой мобильных объектов на основе разработанных метода и методики.

Вывод к главе 1

В первой главе выполнен анализ современного состояния и тенденций развития прикладной фотограмметрии и подходов к формированию изображений высокого разрешения. Показано, что расширение практического применения фотограмметрии сопровождается ростом требований к детализации и достоверности результатов, что обуславливает необходимость получения и обработки изображений высокого разрешения в полевых условиях при ресурсных ограничениях конечных устройств.

Установлено, что типовая система прикладной фотограмметрии на верхнем уровне представима последовательностью этапов «получение данных - обработка - анализ/распознавание - выдача результата», причём итоговая точность в решающей степени определяется качеством входных изображений, формируемых подсистемой «камера» (оптика и сенсор). Для значимой части прикладных сценариев

одионочный кадр, полученный массовыми мобильными устройствами, не обеспечивает требуемого сочетания охвата сцены и «честного» пространственного разрешения для последующей метрической обработки.

Проведённый анализ существующих методов формирования изображений высокого разрешения позволяет выделить два основных направления их развития.

Первое направление объединяет методы, в которых несколько изображений или фрагментов сцены совмещаются по общим признакам после оценки геометрических преобразований. За счёт дополнительных наблюдений объекта и объединения перекрывающихся участков такие методы увеличивают объём информации, представленной в результирующем изображении.

Второе направление охватывает методы повышения разрешения и улучшения качества, восстанавливающие недостающую информацию с помощью статистических моделей, классических алгоритмов обработки изображений и обучаемых методов. Их применение в мобильных и автономных системах ограничивается снижением устойчивости пространственной регистрации при изменении условий съёмки, ошибками позиционирования отдельных фрагментов и ограниченными ресурсами устройства. Существенную роль также играют требования к времени обработки и энергопотреблению.

На основании проведённого анализа сформулированы требования к разрабатываемой системе формирования изображений высокого разрешения. Основными из них являются:

- снижение требований к аппаратной части отдельных устройств, прежде всего к характеристикам фоторегистрирующей подсистемы, при сохранении метрической информативности формируемого изображения;
- обеспечение устойчивого и точного совмещения фрагментов при воздействии факторов, приводящих к изменению условий регистрации;
- возможность реализации распределённого вычислительного процесса в автономной группе мобильных устройств при ограничениях по производительности, памяти, энергопотреблению и пропускной способности каналов связи.

Установлено, что одним из основных путей выполнения указанных требований является переход от использования одиночного кадра как единственного источника измерительной информации к формированию результирующего изображения на основе суперпозиции частично перекрывающихся фрагментов. Такой подход позволяет повысить эффективное число «честных пикселей» результирующего изображения без пропорционального увеличения требований к фоторегистрирующей подсистеме отдельного мобильного объекта.

Полученные выводы образуют постановочную основу для второй главы, в которой разрабатывается метод обработки информации при формировании изображения высокого разрешения, ориентированный на алгоритмическую и программно-аппаратную реализацию.

ГЛАВА 2. МЕТОД ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНОГО ОБЪЕКТА

В данной главе разрабатывается метод обработки информации при формировании изображений высокого разрешения, отличающийся от известных использованием процесса адаптивной сшивки частей изображения на основе шаблона низкого разрешения с совмещением по ключевым точкам и анализом контуров, что позволяет уменьшить локальные искажения, снизить аппаратные требования и повысить мобильность систем прикладной фотограмметрии [116].

С позиции введённого в первой главе показателя «честных пикселей» предлагаемый подход направлен на компенсацию недостаточной измерительной информативности одиночного кадра мобильной камеры за счёт объединения нескольких частично перекрывающихся наблюдений одной и той же сцены.

Ограниченность одиночного кадра определяется существующим компромиссом между пространственным охватом объекта и количеством пикселей, приходящихся на его локальные элементы. При увеличении дистанции съёмки обеспечивается размещение объекта целиком в поле зрения камеры, однако уменьшается пространственное разрешение его отдельных участков. При уменьшении дистанции до объекта D_o возрастает детализация локальных областей, однако полный объект, отображаемый на Ω_{tar} в какой-то момент, перестаёт помещаться в пределах одного кадра Ω_i . Поэтому результирующее изображение высокого разрешения I^{HR} предлагается формировать из набора частично перекрывающихся фрагментов $\mathcal{E}$, каждый из которых $\mathcal{E}_i$ добавляет сведения о соответствующей области сцены Ω_i . Рост информативности I_i^{HR} в этом случае связан не с искусственным увеличением числа элементов изображения, а с накоплением реальных наблюдений при сохранении их пространственного соответствия.

Объекты прикладной фотограмметрии для эффективного решения задач должны содержать геометрически значимые элементы. Это могут быть внешние

границы или контуры, углы, линии сопряжения поверхностей и другие структурные признаки, используемые при измерениях. При максимальном заполнении кадра часть таких элементов оказывается в области краев фрагментов, где сильнее проявляются погрешности и искажения, которые дает фоторегистрирующая система. Обычно это дисторсия объектива, перспективные искажения, неоднородность масштаба, смазы и ошибки локальной регистрации. Поэтому простого объединения фрагментов Ω_i между собой недостаточно и при формировании итогового изображения становится необходимым учитывать пространственные искажения исходных данных.

Регистрация фрагментов просто по ключевым точкам $\{K_p^{(m)}\}$ позволяет определить относительное положение соседних фрагментов между собой и привести их к системе координат опорного шаблона I^{LR} . Вместе с тем совпадение локальных точечных признаков не может гарантировать полную геометрическую согласованность различных структур объектов, даже содержащих такие детали как границы, линии сопряжения и контура. В перекрывающихся областях сохраняется дублирование линий, смещение углов, разрывы контуров, локальные изменения масштаба и границы сшивки, заметные даже при визуальном анализе.

Для минимизации этих эффектов в разработанном методе используется двухэтапная процедура регистрации. Сначала фрагменты глобально совмещаются с опорным шаблоном по ключевым точкам. А затем их взаимное положение локально уточняется по контурным структурам.

Таким образом, контурная информация используется не и для повышения визуального качества результирующего изображения, и как дополнительный источник данных, обеспечивающий сохранение согласованности структурно значимых элементов объектов на соседних фрагментах Ω_i при выполнении разработанной процедуры формирования изображения высокого разрешения I^{HR} .

В настоящей главе описывается разработанный метод обработки информации при формировании изображения высокого разрешения I^{HR} на основе объединения частично перекрывающихся фрагментов сцены Ω_i в композиции $\mathcal{E}$, полученных с использованием мобильных устройств $\{MO_i\}$.

В рамках метода определяются основные этапы преобразования и обработки данных. Особое внимание уделено устранению остаточных геометрических рассогласований, сохраняющихся после первичной регистрации по ключевым точкам соседних фрагментов $\{K_p^{(m)}\}$, с использованием контурной информации $\{C_i\}$ о структурно значимых элементах.

2.1 Анализ процесса обработки информации при формировании изображения высокого разрешения

В рамках разрабатываемого в данной главе метода результирующее изображение высокого разрешения I^{HR} формируется как композиция частично перекрывающихся фрагментов Ω_i . Фрагменты последовательно регистрируются и приводятся к системе координат опорного изображения низкого разрешения при помощи одного MO или на множестве MO_i . Такая схема обусловлена ограничением фоторегистрирующей системы одного объекта с низкими аппаратными требованиями N_i^{hon} .

Для согласования этих требований введено двухуровневое представление объекта. Первый уровень образует обзорное изображение, используемое как опорный шаблон I^{LR} и единая система координат внутри этого шаблона. Второй уровень представлен набором локальных фрагментов Ω_i повышенного пространственного разрешения, насколько это может быть получено с фоторегистрирующей системы отдельного MO_i . Соседние фрагменты получают с долей перекрытия ρ_i , достаточной для установления соответствий и оценки параметров пространственного преобразования, то есть с пределом в ρ_{min} .

Первичная привязка к шаблону выполняется по ключевым точкам $\{K_p^{(m)}\}$ и их дескрипторам $\{D_s^{(m)}\}$. Точечные соответствия, описывают геометрию сцены лишь частично - совпадение найденных ключевых точек и дескрипторов в целом

не означает полного совпадения протяжённых структур между соседними фрагментами. Наиболее заметными являются ошибки в областях с внешними границами, углами и линиями сопряжения объектов на соседних фрагментах. Например, если объект занимает большую часть кадра I_i^{HR} или распространяется на соседний фрагмент I_j^{HR} , то эти элементы нередко попадают на область сшивки или совмещения (то есть на края фрагмента), где сильнее всего проявляются такие деструктивные эффекты как дисторсия, перспективные искажения и неоднородность масштаба. Поэтому единое проективное преобразование может согласовать ключевые точки с требуемой точностью, но оставить несовпадение контуров.

Именно по этой причине в разработанный метод включён дополнительный этап локального уточнения на основе контурного анализа. В перекрывающихся областях $\Omega_{i,j}$ сравнивается положение структурно значимых границ, после чего компенсируются остаточные локальные смещения при помощи полей локального уточнения u_i . Двухэтапная схема сочетает глобальную привязку фрагментов Ω_i к общей системе координат шаблона низкого разрешения I^{LR} с локальной коррекцией положения контурных элементов. Это повышает геометрическую согласованность изображения и даёт возможность формировать метрически информативный результат на одном $МО$ при последовательной съемке или на группе $\{МО_i\}$ с ограниченными вычислительными, энергетическими и аппаратными ресурсами [117].

2.1.1 Основные этапы разработанного метода

Структура метода определяется двумя взаимосвязанными задачами: полным покрытием исследуемой сцены Ω_{tar} информативными частично перекрывающимися фрагментами Ω_i и их геометрически согласованным объединением на основе композиции фрагментов $\mathcal{E}$. Поэтому наряду с получением и глобальной регистрацией фрагментов предусмотрено локальное уточнение их взаимного положения по контурам $\mathcal{C}_i$ в областях перекрытия с определенной долей ρ_i .

Метод включает следующие основные этапы:

1. **Формирование опорного шаблона низкого разрешения.** Создаётся обзорное изображение, задающее единую систему координат сцены и служащее основой для последующей регистрации локальных фрагментов I^{LR} .
2. **Определение схемы покрытия сцены фрагментами высокого разрешения.** С учётом размеров исследуемой области, размеров отдельного фрагмента Ω_i и заданной доли перекрытия ρ_i определяются число фрагментов m , а также их расположение. Композиция $\mathcal{E}$ считается достаточной, если обеспечивает полный охват целевой области Ω_{tar} , перекрытие, необходимое для устойчивой регистрации соседних фрагментов, и требуемое эффективное число информационно значимых пикселей $N_{px,req}^{hon}$. Минимальное число фрагментов выбирается как максимум между количеством, необходимым для полного покрытия сцены, и количеством, обеспечивающим заданное эффективное число информационно значимых пикселей $N_{px,req}^{hon}$.
3. **Получение набора частично перекрывающихся фрагментов.** Съёмка организуется так, чтобы покрыть целевую область и сформировать общие участки, достаточные для устойчивой регистрации.
4. **Предварительная обработка фрагментов.** При наличии необходимых вычислительных ресурсов выполняются коррекция яркости, подавление шума, нормализация масштаба и подготовка изображений к сопоставлению с шаблоном низкого разрешения.
5. **Глобальная регистрация фрагментов по ключевым точкам.** Для каждого фрагмента и соответствующего участка опорного шаблона выделяются ключевые точки и вычисляются их дескрипторы. По найденным соответствиям оценивается геометрическое преобразование, определяющее общее положение, масштаб, поворот и перспективное отображение фрагмента в координатах шаблона. Результатом этапа является глобально согласованное размещение фрагментов, которое, однако, может сохранять локальные ошибки вдоль границ объектов и в периферийных областях кадров.

6. **Локальное уточнение взаимного положения по контурам.** В областях перекрытия выделяются контуры объектов и оценивается согласованность положения соответствующих границ. При обнаружении дублирования линий, разрывов контуров, смещения углов или локального расхождения границ выполняется уточнение взаимного положения фрагментов. Данный этап компенсирует остаточные деформации, которые не могут быть устранены единой гомографией, оцененной только по дискретным ключевым точкам.

7. **Агрегирование фрагментов и формирование результирующего изображения.** После завершения процедур глобальной регистрации и локального уточнения взаимного положения выполняется объединение согласованных фрагментов в единое изображение высокого разрешения. Формирование результирующего изображения осуществляется с учётом полученных параметров пространственного преобразования и обеспечивает сохранение геометрической согласованности границ объектов в областях перекрытия.

8. **Оценка результата по критериям качества, времени и ресурсных затрат.** На заключительном этапе производится оценка соответствия сформированного изображения установленным требованиям по качеству, времени формирования и потреблению аппаратных ресурсов. Качество результирующего изображения оценивается по совокупности объективных показателей, включающих SSIM, PSNR, RMSE reprojection error и Seam Discontinuity Score. Полученные значения сопоставляются с установленными пороговыми критериями. Дополнительно контролируется соблюдение ограничений по времени получения исходных фрагментов, продолжительности их обработки и общему времени формирования результирующего изображения, а также по вычислительным, энергетическим и коммуникационным ресурсам системы.

Разделение процедуры регистрации на глобальный и локальный этапы обусловлено различием информационных признаков, используемых для определения взаимного положения фрагментов изображения в композицию $\mathcal{E}$. Глобальная реги-

страция основывается на сопоставлении дискретного набора локальных соответствий, достаточного для оценки параметров пространственного преобразования фрагмента относительно опорного изображения I^{LR} .

Множества контуров фрагментов $\mathcal{C}_i$, в отличие от ключевых точек $\{K_p^{(m)}\}$, описывают непрерывную геометрическую структуру объектов. Благодаря этому качество полученного решения при формировании изображений высокого разрешения I^{HR} можно оценивать не только в отдельных точках регистрации, но и на промежуточных участках, где после глобального преобразования без контурного уточнения могли бы сохраняться локальные рассогласования.

Контурное уточнение здесь рассматривается именно как локальная коррекция уже сформированного глобального совмещения путем выделения и использования дополнительной информации о форме и границах объектов фрагмента. Совместное использование точечных и контурных признаков даёт более полное геометрическое описание сцены.

Поэтому разработанный метод объединяет классические фотограмметрические процедуры оценки проективных преобразований и сшивки перекрывающихся изображений с двухэтапной схемой, в которой опорное изображение низкого разрешения I^{LR} задаёт общую систему координат для объединяемых фрагментов.

Предлагаемый подход не синтезирует простую детализацию одиночного изображения за счет объединения фрагментов, снятых на камеры мобильных объектов - увеличение качества связано с ростом числа информационно значимых пикселей I_i , вкладываемых в подкадры Ω_i с долей перекрытия $\rho_{i,j}$, а не с простым интерполяционным увеличением размера изображения.

По этой причине оценивать метод только по визуальному качеству получаемого результата недостаточно. Необходимо дополнительно контролировать полноту покрытия целевой области и величину взаимного перекрытия, от которой зависит устойчивость пространственной регистрации. Если часть сцены Ω_i покрыта недостаточно либо соседние фрагменты композиции $\mathcal{E}$ не удаётся надёжно совме-

стить, увеличение размеров результирующего изображения и его полного покрытия Ω_{tar} не сопровождается ростом числа информационно значимых пикселей и не повышает измерительную информативность.

Рассмотрим далее процесс совмещения подкадров для формирования метрически достоверного изображения высокого разрешения.

2.1.2 Процесс совмещения подкадров по ключевым точкам и дескрипторам на основе шаблона

Как уже говорилось выше, совмещение по ключевым точкам используется для определения начального пространственного размещения и инициализации локального преобразования фрагментов относительно опорного шаблона низкого разрешения I^{LR} . При этом, предполагается, что найденные соответствия между соседними фрагментами могут быть описаны общей геометрической моделью и распределены по площади каждого совмещаемого фрагмента Ω_i достаточно равномерно для устойчивой оценки параметров слияния.

На практике это условие выполняется не всегда. Ключевые точки чаще концентрируются в текстурно насыщенных областях, тогда как протяжённые границы, однородные поверхности и периферийные участки представлены слабее. Кроме того, единая гомография хорошо описывает плоскую сцену или изображения, полученные из близких положений камеры, но не полностью компенсирует параллакс, локальные деформации и неодинаковую дисторсию по полю кадра. Выравнивание каждого подкадра с опорным шаблоном выполняется по следующей схеме:

1. **Извлечение ключевых точек и дескрипторов.** Для каждого изображения (подкадра и шаблона) находят локальные ключевые точки. В качестве алгоритмов детектирования и описания признаков целесообразно использовать устойчивые методы масштабирующего инварианта, такие как SIFT, ORB или AKAZE согласно применяемой онтологии [118, 119].

2. **Сопоставление дескрипторов.** После получения дескрипторов подбираются пары соответствующих точек между подкадром и участком шаблона. Наиболее популярная стратегия – поиск ближайшего и следующего ближайшего соседа в пространстве дескрипторов для каждой точки (алгоритм NNDR). Только «классически» поиск соответствия проводится по всему изображению шаблона, а в нашем случае только внутри соответствующего «квадрата» съемки, так как пространственное позиционирование уже определило сектор наиболее вероятного совпадения заранее. В этом случае множество исходных совпадений ключевых точек между будет оптимальным, а неоднозначные или ложные совпадения будут фактически исключены [120].

3. **Отсеивание выбросов и оценка гомографии.** Из найденных совпадений находим наиболее «правдоподобный» геометрический трансформ. Для этого обычно применяют методы типа RANSAC (Random Sample Consensus) – пока будем ориентироваться на него. В результате запуска итерационного алгоритма выбирается модель гомографии с наибольшим числом «инлайеров». Окончательный вариант совмещения уточняется методом наименьших квадратов по всем «инлайерам» RANSAC. Гомография переводит координаты подкадра к координатам шаблона согласно проективной модели [121].

4. **Применение пространственных преобразований.** Полученная гомография используется для проективного преобразования и переноса пикселей подкадра в систему координат опорного шаблона. Каждый пиксель подкадра отображается в соответствующую ему позицию шаблона. При этом для новых нецелочисленных координат применяется интерполяция, и создаётся совмещённое изображение, частично перекрывающее шаблонную картинку. При необходимости на данном этапе также может выполняться коррекция остаточных геометрических искажений изображения, обусловленных радиальной и тангенциальной дисторсией объектива, с использованием известных параметров калибровки камеры. После выполнения глобальной регистрации формируется предварительное объединённое

изображение, однако в областях перекрытия вследствие остаточных ошибок регистрации могут сохраняться локальные смещения, проявляющиеся в виде разрывов контуров, двоения линий и заметных швов [122].

В результате выполнения процедуры регистрации каждому фрагменту ставится в соответствие матрица гомографии, определяющая его проективное преобразование в систему координат опорного шаблона. Тем самым устанавливается единая геометрическая модель, описывающая взаимосвязь между координатами соответствующих точек сцены в опорном изображении и регистрируемом фрагменте [123, 124].

Оценка параметров гомографии может выполняться, например, с использованием алгоритма RANSAC, обеспечивающего устойчивость регистрации при наличии ложных соответствий. Оптимальные параметры преобразования определяются путём минимизации ошибки репроекции для множества согласованных ключевых точек $\{K_p^{(m)}\}$, что обеспечивает получение глобально согласованного пространственного положения фрагмента относительно опорного шаблона I^{LR} . Использование устойчивых локальных дескрипторов $\{D_s\}$ совместно с моделью проективного преобразования $u(p)$ в результате совмещения контуров C_i позволяет обеспечить высокую точность регистрации при наличии достаточного количества информативных текстурных признаков в областях взаимного перекрытия фрагментов.

Минимизация ошибки репроекции в точках соответствия фрагментов не гарантирует полного совпадения протяжённых геометрических структур объекта. В областях между ключевыми точками могут сохраняться остаточные локальные расхождения - по этой причине результат глобальной регистрации рассматривается в разработанном методе именно как начальное приближение, подлежащее последующему локальному уточнению по контурным признакам, рассмотренному далее в п. 2.1.3.

2.1.3 Процесс уточнения совмещения с использованием анализа контуров

Как уже говорилось выше, после глобальной регистрации по ключевым точкам $\{K_p^{(m)}\}$, фрагменты $\{\Omega_i\}$ оказываются приведены к общей системе координат относительно I^{LR} , однако в областях перекрытия могут сохраняться локальные геометрические рассогласования вследствие того, что отсутствуют непосредственные ограничения на совпадение всех протяжённых границ объектов, особенно на пересечении снимков с камер соседних мобильных объектов в композиции $\mathcal{E}$.

Для задач прикладной фотограмметрии указанное ограничение имеет принципиальное значение. Даже незначительные остаточные смещения совпадающих границ приводят к появлению двойных контуров, смещению характерных точек, разрывам линий и локальным деформациям формы объекта. В результате изображение может сохранять визуальную целостность, особенно на низких масштабах отображения, однако его метрическая достоверность оказывается недостаточной для решения задач прикладной фотограмметрии.

Обычно, при съёмке объект или объекты, как правило, стремятся расположить таким образом, чтобы максимально использовать площадь кадра. В результате внешние границы и угловые элементы объектов оказываются вблизи границ кадра, где наиболее заметно проявляются погрешности съёмки, такие как остаточная оптическая дисторсия, перспективные искажения и погрешности, возникающие при выполнении проективного преобразования. Если множество ключевых точек сосредоточено преимущественно во внутренних областях объекта, оценённая по ним гомография может не обеспечить требуемой точности согласования его внешних контуров.

Исходя из этого, в работе выдвигается гипотеза, согласно которой дополнение этапа глобальной регистрации локальным контурным уточнением позволяет уменьшить остаточные ошибки совмещения в структурно значимых областях

сцены. При этом контурные признаки рассматриваются как дополнительное геометрическое ограничение, обеспечивающее согласование не только дискретных точечных соответствий, но и непрерывных границ объектов [125].

Идея состоит в следующем:

1. **Детектирование границ объектов.** На уже сшитом по шаблону изображении или в перекрывающихся областях исходных кадров выделяются контуры объектов. В таких задачах обычно используются операторы градиента, например, оператор Собеля или детектор Кэнни. Результатом работы этих алгоритмов является набор координат пикселей, принадлежащих видимым границам. Так как контуры отражают форму объектов сцены, а также неразрывно связаны с морфологией, то их повторяющееся расположение между совмещенными подкадрами и шаблоном сигнализирует об окончательной правильности выравнивания.

2. **Анализ соответствия контуров.** Между двумя перекрывающимися изображениями ищутся связанные сегменты контуров. Это можно делать, например, по близости формы или по локальной корреляции профилей вдоль предполагаемых линий контуров. Соответствие контурных сегментов определяется с учётом их взаимного положения после глобального преобразования, локального направления градиента, ориентации, кривизны и протяжённости. Рассматриваются только контуры, расположенные в общей области перекрытия и удовлетворяющие заданным ограничениям по пространственной близости и сходству формы.

3. **Локальная оптимизация формы.** Используя найденные пары контуров, вычисляется малое локальное преобразование (например, свободная деформация или локальная аффинная поправка), которое лучше совместит края. В некоторых работах предлагается включать линейные признаки в оптимизационную модель выравнивания. Можно, например, минимизировать сумму квадратов расстояний между точками сопоставленных контуров как $J_{cont}(u_i) = \sum_{p \in \mathcal{C}_i \cap \Omega_i} D_T^2(p + u_i(p)) + \lambda_r \mathcal{R}(u_i)$, где $\mathcal{C}_i$ – это контур i -го фрагмента, D_T – карта расстояний до ближайшего контура шаблона, u_i – локальное поле смещений, $\mathcal{R}(u_i)$ – регуляризатор поля смещений, а $\lambda_r > 0$ – коэффициент регуляризации, определяющий относи-

тельный вклад ограничения гладкости поля локальных смещений u_i в общий функционал совмещения контуров. По найденным парам контурных сегментов оценивается локальная поправка к глобальному преобразованию. Параметры поправки определяются путём минимизации суммы расстояний между соответствующими точками контуров с добавлением регуляризующего ограничения, препятствующего возникновению резких и геометрически необоснованных деформаций. В зависимости от характера остаточного рассогласования локальная поправка может быть представлена сдвигом, аффинным преобразованием либо другими подходящими локальными деформациями.

4. **Построение итогового изображения.** после корректировки трансформаций подкадр перерисовывается и вновь сшивается со всеми снимками. Дополнительно выполняется плавное слияние перекрывающихся областей (например, с помощью многополосного блендинга), чтобы устранить видимые швы. Коррекция по контурам устраняет двоение линий и «разрывы» на стыках: теперь границы объектов на всех изображениях совпадают, а шов становится незаметным.

Таким образом, анализ контуров выступает дополнительным геометрическим ограничением, которое учитывает структуру сцены «по формам» объектов. Это особенно важно в ситуациях с параллаксом, когда жёсткая гомография не в состоянии выровнять близкие и дальние планы одновременно. По своей сути, включение линейных признаков (контуров) в задачу сшивки позволяет задать «плавный» глобальный критерий (между проективным и подобным преобразованием), улучшая выравнивание.

В контексте данной задачи уточнение по контурам обеспечивает:

- устранение артефактов, возникающих вследствие несовпадающих краев предметов на границах швов;
- коррекцию искажений, возникающих тогда, когда камера не проецирует строго на плоскость, - в таком случае мелкие локальные искажения (наклоны, изгибы) могут быть выправлены локальным деформированием;
- усиление стабильности совпадений за счёт учёта линейных структур сцены различного масштаба.

Таким образом, предложенный в диссертационной работе метод обеспечивает формирование геометрически согласованного изображения высокого разрешения с минимизацией остаточных рассогласований в областях перекрытия. Реализация предложенного подхода требует разработки формальной модели процесса обработки информации, описывающей последовательность получения, регистрации, уточнения и объединения фрагментов изображения.

Поэтому далее формализуется последовательность обработки информации, лежащая в основе разработанного метода формирования изображений высокого разрешения с использованием опорного шаблона. Для математического описания метода и его последующей программной реализации вводятся модель представления данных и вспомогательные модели для получения и обработки фрагментов, используемые далее в экспериментальном исследовании, приведенном в 4 главе диссертационной работы.

2.2 Формализация метода формирования изображений высокого разрешения при помощи мобильных объектов

2.2.1 Формализация исходного представления данных

Целое изображение или его часть (фрагмент, подкадр), формируемого на основе серии снимков, как уже упоминалось ранее, будем понимать как двумерную матрицу I с размерами $H \times W$, где H – это высота изображения, а W – это его ширина, такую, что $I: \{1, \dots, H_{img}\} \times \{1, \dots, W_{img}\} \rightarrow \mathbb{R}^z$, где $z = 1$ для полутонового изображения и $z = 3$ для RGB.

Каждый элемент матрицы $I(y, x)$ соответствует значению яркости и цвета пикселя в соответствующей позиции (y, x) . Для изображений в серых тонах каждая точка в позиции (y, x) выражена только для одного цветового пространства, тогда

как точка для изображения в многомерной цветовой палитре, например в RGB, выражается как:

$$I(y, x) = \begin{bmatrix} R(y, x) \\ G(y, x) \\ B(y, x) \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

где $\{R, G, B\}$ – это множество значений каналов красного, зеленого или синего цветов.

Матричное представление изображения в данной работе воспринимается не только как визуализация, но и как способ представления морфологической структуры данных. Это дает возможность отражать различные элементы изображений в виде бинарных матриц (например, присутствие или отсутствие контура объекта), а также использовать динамическое представление информации, описывающие изменение изображений или объекты через такие операторы морфологии, как эрозия или дилатация [126 – 128].

Кроме того, морфологическая структура изображения в рамках модели помогает выполнять операции наложения или сопоставления составных частей изображения через операторы трансформации и преобразования матриц, например свертки исходного изображения с морфологической структурой [129].

Далее, так как в задаче формирования изображений высокого разрешения фигурируют такие понятия, как распределенное получение, хранение и обработка частей кадра, то необходимо ввести понятие части составного изображения как подматрицы.

Таким образом, для исходной матрицы изображения I и его точек:

$$I(y, x), y \in \{1, \dots, H_{img}\}, x \in \{1, \dots, W_{img}\}, \quad (2.2)$$

существует ее часть $I_{crop} = I(y_1:y_2, x_1:x_2)$ при условиях $1 \leq y_1 \leq y_2 \leq H_{img}$ и $1 \leq x_1 \leq x_2 \leq W_{img}$, имеющая размер $H_{crop} = y_2 - y_1 + 1$ на $W_{crop} = x_2 - x_1 + 1$.

Тогда основная цель работающего устройства может быть сформирована как покрытие целевой области Ω_{tar} бинарной маской M_{tar} , представляемой в виде

$$M_{tar}(y, x) = \begin{cases} 1, & (y, x) \in \Omega_{tar} \\ 0, & (y, x) \notin \Omega_{tar} \end{cases}. \quad (2.3)$$

В этом случае идеальным вариантом было бы создание симметричной «матрицы» для формирования кадров (например, 4 x 4 или 9 x 9), но в реальной ситуации распределение кадров может быть другим, что необходимо учитывать на практике.

Далее необходимо формализовать этот процесс раскадровки для мобильного объекта, который мог бы двигаться, делать снимки при решении задачи формирования изображений высокого разрешения.

Каждая точка или ячейка целевой области M^{req} должна быть покрыта хотя бы одним фрагментом изображения, полученным в процессе съёмки. В рамках разрабатываемого метода данная матрица используется как формализованное описание целевой сцены и покрытия, а не как модель управления мобильным объектом. Соответственно, под системой получения данных далее понимается процедура формирования множества частично перекрывающихся фрагментов, каждый из которых соответствует определённой области исследуемой сцены и подлежит последующей регистрации относительно опорного шаблона. При проведении вычислительных экспериментов процесс получения таких фрагментов моделируется отдельно и рассматривается как вспомогательная процедура генерации входных данных, не входящая непосредственно в состав метода обработки информации.

Опорный шаблон I^{LR} , фрагменты высокого разрешения $\{I_i^{HR}\}$ и области их покрытия $\{\Omega_i\}$ в разработанной модели задаются как взаимосвязанные матричные структуры в единой системе координат. Это позволяет представить регистрацию как поиск пространственных преобразований $u(p)$, при которых фрагменты размещаются согласованно, целевая область покрывается полностью, а заданное доля перекрытия $\rho_{i,j}$ сохраняется.

Информативность результата при таком представлении определяется не номинальным числом пикселей, а количеством элементов, которые после регистрации и контурного уточнения сохраняют геометрическую связь с реальной сценой. Элементы, положение которых получено только посредством интерполяции или сглаживания и не подтверждается геометрией сцены, не рассматриваются как са-

мостоятельные источники измерительной информации. Матричная модель тем самым разделяет номинальное и эффективное разрешение результирующего изображения.

Представление сцены и её фрагментов используется далее для формализации метода и проверки условия достаточности, введённого в первой главе через эффективное число информационно значимых пикселей и суперпозицию частично перекрывающихся фрагментов.

2.2.2 Формирование схемы покрытия сцены и набора фрагментов

Для программной реализации и экспериментального моделирования необходимо формально описать получение набора фрагментов в целевой области. Наряду с основной моделью обработки информации поэтому вводится вспомогательная модель достижения мобильным объектом областей съёмки. Она описывает покрытие сцены, затраты на перемещение и структурные ограничения процесса формирования входных данных [130 – 131]. По содержанию этот этап соответствует декомпозиции сцены на фрагменты, введённой в первой главе, и должен удовлетворять условиям покрытия, перекрытия и достаточности результирующего изображения, заданным в п. 1.3 диссертационной работы.

В простейшем случае данная вспомогательная модель относится к одному мобильному объекту, который последовательно получает фрагменты сцены из различных положений:

$$\Pi = \{\pi_i\}_{i=1}^n, \quad (2.4)$$

где π_i – множество положений и ориентаций МО при получении i -го фрагмента, и каждому π_i соответствует собственная область покрытия Ω_i и целевой фрагмент I_i^{HR} .

В дальнейшем эта модель используется не для раскрытия метода обработки как такового, а для задания программной схемы генерации последовательности положений съёмки в эксперименте. Смысл этой модели заключается в формализации

взаимосвязи между структурой покрытия сцены (композицией $\mathcal{E}$) и временными, вычислительными и иными ресурсными ограничениями R , сформулированными в п. 1.3 диссертационной работы.

Для описания процесса получения фрагментов вводится фактическая схема покрытия сцены $\mathcal{E}$, определяющая совокупность областей $\{I_i^{HR}\}$, подлежащих съёмке. Каждой области покрытия Ω_i в предложенной модели как раз и соответствует один или несколько фрагментов изображения I_i^{HR} , получаемых при помощи камеры мобильного объекта. При построении схемы покрытия должны выполняться два основных условия:

- совокупность фрагментов должна обеспечивать полный охват целевой области сцены Ω_{tar} ;
- соседние фрагменты должны содержать достаточную область (долю) взаимного перекрытия ρ_{i,j_-} , необходимую для их устойчивой взаимной регистрации.

Следует отметить, что конкретный способ движения мобильного объекта на позиции съёмки в настоящей главе не рассматривается, поскольку он относится скорее к организации работы мобильных объектов, а не конкретно к предложенному методу обработки информации для получения изображений высокого разрешения в задачах прикладной фотограмметрии.

В общем виде достижение целей съёмки и завершение миссии формирования составного изображения высокого разрешения можно описать через матрицу M_{req} и систему позиций с помощью целевой функции $J_{cov}(\Pi)$. Для схемы съёмочных поз Π^* требуется минимизировать суммарную стоимость покрытия:

$$\begin{cases} \Pi^* = \underset{\Pi}{argmin} J_{cov}(\Pi), \\ J_{cov}(\Pi) = \alpha_L L(\Pi) + \alpha_O \Phi_{over}(\Pi) + \alpha_G \Phi_{gap}(\Pi) + \alpha_E E_{move}(\Pi) \end{cases} \quad (2.5)$$

где $L(\Pi)$ – суммарная длина перемещений между съёмочными позициями, Φ_{over} – штраф за перекрытие сверх допустимого диапазона, Φ_{gap} – штраф за непокрытые участки, E_{move} – энергия перемещения, а $\alpha_L, \alpha_O, \alpha_G, \alpha_E \geq 0$ [132–135].

Выражение (2.5) используется в программной модели как функционал качества схемы покрытия сцены. В отличие от основной части метода, где центральными являются регистрация и сшивка фрагментов, здесь формализуется только выполнимость и рациональность построения набора входных данных для последующей обработки.

При этом число областей покрытия должно определяться не только геометрией сцены, но и требуемым эффективным разрешением результирующего изображения. Иными словами, схема покрытия формируется так, чтобы совокупность фрагментов обеспечивала не просто полный охват сцены, а достижение требуемого количества информативных пикселей при допустимой доле перекрытия и ограничениях по времени формирования результата.

Следовательно, увеличение числа фрагментов само по себе не является достаточным условием повышения качества результата. Если фрагменты избыточно перекрывают уже покрытые области или не дают новых устойчиво регистрируемых признаков, их вклад в число «честных пикселей» уменьшается. Поэтому схема покрытия должна обеспечивать баланс между новым покрытием сцены, необходимым перекрытием для регистрации и ограничением избыточности, чтобы суперпозиция фрагментов действительно увеличивала измерительную информативность итогового изображения.

Внесение в модель дополнительных элементов обусловлено тем, что в условиях динамического процесса получения подкадров, критически важным становится не только минимизация времени и ресурсов, но и обеспечение равномерной схемы покрытия, без избыточного перекрытия и появления «пробелов».

2.2.3 Анализ доступных ресурсов МО для оценки возможности миссии

Для оценки выполнимости метода целесообразно выделить следующие группы ресурсов:

- ресурсы формирования данных - разрешающая способность камеры, число «честных» пикселей, параметры оптики и устойчивость к искажениям;
- вычислительные ресурсы - производительность и объём памяти, определяющие возможность выполнения регистрации, локального уточнения и сшивки;
- коммуникационные ресурсы - доступная пропускная способность и допустимый объём обмена метаданными или фрагментами;
- временные ресурсы - допустимое время захвата и формирования результирующего изображения.

Такое разделение согласуется с постановкой первой главы, где подсистема камеры рассматривается как основной источник аппаратных ограничений, а вычислительные, коммуникационные и временные параметры - как условия выполнимости цикла формирования изображения.

В контексте настоящей работы, именно ресурсы формирования данных являются определяющими, поскольку, как показано в первой главе, для массовых мобильных устройств вычислительные и коммуникационные возможности во многих случаях достаточны, тогда как ограниченность качества одного кадра определяется прежде всего камерой.

Для целей программного моделирования эти ресурсы должны быть представлены через пороговые и динамические параметры, позволяющие проверить, способен ли конкретный мобильный объект завершить цикл получения и обработки фрагментов без нарушения ограничений по времени и качеству.

Энергетическая модель системы может быть представлена как совокупность резервов энергии мобильного объекта.

Если определить B_k как резерв МО на k -й позиции, то изменение резерва может быть описано уравнением:

$$\frac{dB_k(t)}{dt} = -[P_k^{comp}(t) + P_k^{cam}(t) + P_k^{mov}(t) + P_k^{com}(t)], \quad (2.6)$$

где P_k^{comp} – мощность, затрачиваемая вычислительной подсистемой, P_k^{cam} – мощность, затрачиваемая на снимок, P_k^{mov} – мощность, затрачиваемая на перемещение, а P_k^{com} – мощность, затрачиваемая на коммуникации [136].

Если рассматривать эту часть модели дискретно, то есть от точки к точке, то можно вывести следующую формулу:

$$\begin{cases} P(t) = P_k^{comp}(t) + P_k^{cam}(t) + P_k^{mov}(t) + P_k^{com}(t), \\ B_k(t_{s+1}) = B_k(t_s) - \int_{t_s}^{t_{s+1}} P(t)dt, \end{cases} \quad (2.7)$$

В экспериментальной части диссертационной работы выражения (2.6) – (2.7) используются как часть программной модели оценки выполнимости миссии и допустимого числа шагов получения фрагментов. Они не подменяют модель обработки изображения, а задают ограничения, в пределах которых метод формирования результирующего изображения может быть реализован на конечном устройстве. Так как мощность, затрачиваемая на вычислительные операции, зависит от того, сколько операций в секунду может выполнять процессор МО в i -й позиции, то также можно выделить модель вычислительной мощности, позволяющую промоделировать затрат ресурсов системы как [137, 138]:

$$\begin{cases} t_{ki}^{comp} = \frac{C_i^{ops}}{F_k^{eff}}, \\ E_{ki}^{comp} = \int_0^{t_{ki}^{comp}} P_k^{comp}(t)dt, \end{cases} \quad (2.8)$$

где C_i^{ops} – оценка числа затрачиваемых вычислительных операций, F_k^{eff} – эффективная производительность устройства, а E_{ki}^{comp} – энергия, затрачиваемая на обработку данных.

Итоговая вычислительная нагрузка определяется сложностью обрабатываемых фрагментов, доступным вычислительным ресурсом и локальными коэффициентами, отражающими влияние архитектурных и программных факторов [139, 140].

В рамках метода обработки информации анализ ресурсов используется не для описания поведения мобильного объекта как движущейся системы, а для оценки выполнимости вычислительного процесса формирования изображения высокого разрешения. Существенными ресурсами здесь являются: характеристики камеры как источника исходных данных, доступная вычислительная производительность, объём оперативной и долговременной памяти, а также допустимое время формирования результата. Именно эти параметры определяют, возможно ли достижение

требуемого качества изображения за счёт заданного числа фрагментов и выбранных процедур совмещения.

В соответствии с постановкой, приведённой в первой главе, ресурсная оценка должна быть подчинена не задаче описания эксплуатации мобильного объекта как такового, а задаче проверки выполнимости полного цикла формирования изображения при введённых ограничениях по качеству, времени и аппаратным возможностям.

2.2.4 Модель выбора начальной точки и запуска процесса получения фрагментов

Для реализации разработанного метода предполагается, что получение фрагментов осуществляется из таких положений камеры, которые обеспечивают требуемое покрытие целевой области и необходимое перекрытие фрагментов. Конкретные процедуры выбора начальной позиции, движения к ней и управления траекторией не рассматриваются в настоящей главе, поскольку не относятся к сущности метода обработки информации.

Вместе с тем, при построении программной модели системы целесообразно формализовать процедуру выбора начальной позиции съёмки как вспомогательную подзадачу. Такая подзадача не определяет сущность метода обработки информации, однако позволяет воспроизводимо запускать процесс получения фрагментов, сравнивать сценарии движения и оценивать влияние стартовых условий на соблюдение временных и ресурсных ограничений.

Для выбора точек съёмки (шаблона и отдельных фрагментов) в зависимости от выбранного сценария [141–146] можно использовать следующую формулу.

Формула определения расстояния до объекта D_o , при имеющимся угле обзора.

$$D_o = \frac{s}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}, \quad (2.9)$$

где S – размер участка в плоскости, перпендикулярной оптической оси, α – угол обзора камеры мобильного объекта в той же плоскости.

2.2.5 Формирование схемы покрытия сцены фрагментами

Для получения результирующего изображения высокого разрешения целевая область должна быть покрыта множеством частично перекрывающихся фрагментов. С этой целью вводится схема покрытия сцены, определяющая положение областей съёмки относительно опорного шаблона. При формировании такой схемы должны выполняться следующие условия:

1. совокупность фрагментов обеспечивает полный охват целевой области;
2. между соседними фрагментами имеется область перекрытия, достаточная для устойчивого сопоставления признаков и контуров;
3. число фрагментов и плотность покрытия не приводят к нарушению ограничений по времени получения и обработки данных.

Формирование схемы покрытия в рамках данного метода понимается как определение взаимного расположения областей съёмки на плоскости опорного шаблона. Тем самым задача описывается на уровне структуры данных и требований к набору фрагментов, а не на уровне уравнений движения мобильного объекта. Это соответствует постановке, введённой в первой главе, где ключевым является достижение достаточности результирующего изображения при ограничениях по времени и ресурсам [147– 149]. Математическая сущность метода обработки информации по-прежнему определяется процедурами регистрации, контурного уточнения и сшивки, а не уравнениями движения.

Далее рассмотрим часть модели предложенного метода для определения ключевых точек подкадров и компенсации искажений при их объединении.

2.2.6 Расчет ключевых точек и компенсация искажений

После получения фрагментов основной задачей метода становится определение их взаимного положения относительно опорного шаблона. Для этого используется регистрация по инвариантным ключевым точкам, позволяющая устойчиво сопоставлять элементы изображений при наличии изменений масштаба, поворота и локальных искажений.

Расчёт ключевых точек и дескрипторов составляет центральный этап глобальной регистрации фрагментов, выполняемой после их получения в соответствующих областях покрытия, которая используется для того, чтобы сопоставить и идентифицировать части изображений, даже если они подверглись различным преобразованиям (искажениям), таким как масштабирование, поворот или изменение освещения [150, 151].

Под ключевой точкой будем понимать специфические, информативные и инвариантные к трансформациям структуры в изображении (например, углы или контуры), обеспечивающие «ссылки» для сопоставления изображений.

Однако, следует учитывать онтологию выбора алгоритмов формирования ключевых точек, которая способна задать конкретный метод в конкретной ситуации.

В нашем случае мы будем в основном ориентироваться на устойчивый к изменениям масштаба изображений алгоритм SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), который включает в себя три основных этапа:

- построение разностной гауссовской пирамиды для поиска экстремумов;
- уточнение положений и отбраковка слабых ключевых точек;
- присвоение ориентации для достижения инвариантности ориентации.

Дескриптор создается на основе распределения градиентов интенсивности вокруг позиции на изображении. То есть используется гистограмма направления градиентов по сетке 4x4, то есть ячейка. Для каждой ячейки строится гистограмма

углов градиентов по 8-ми направлениям. Итоговый дескриптор представляется вектор с размерностью 128 (то есть 16 ячеек по 8-ми направлениям).

Для каждой ключевой точки, найденной на изображении, нужно запустить алгоритм поиска совпадений. Примером может являться алгоритм лучшего совпадения первого, который идентифицирует ближайшего соседа по евклидовому расстоянию среди дескрипторов второго изображения. То есть проводится расчет дистанции $\delta_{i,j}$ между двумя дескрипторами для первого D_1 и второго D_2 изображений:

$$\delta_{i,j} = \|d_i^{(1)} - d_j^{(2)}\| = \sqrt{\sum_{\ell=1}^d (d_{\ell i}^{(1)} - d_{\ell j}^{(2)})^2}, \quad (2.10)$$

где d – размерность дескриптора.

Использование инвариантных к искажениям дескрипторов делает возможным совмещение или сопоставление подкадров между собой и применение ключевых точек вообще образует глобальный этап совмещения. Его результатом является оценка преобразования, достаточного для начального размещения фрагмента в координатах шаблона. Далее это размещение уточняется локально в областях перекрытия на основе анализа контуров.

Этот этап напрямую соответствует компоненту времени обработки, введённому в первой главе через разложение T_{proc} , поскольку именно операции выделения признаков, сопоставления и оценки преобразований составляют существенную часть вычислительной нагрузки цикла обработки.

Корректировка взаимного положения фрагментов в предлагаемом методе имеет двухуровневый характер. На первом уровне выполняется глобальная регистрация по ключевым точкам, обеспечивающая согласование фрагмента с шаблоном. На втором уровне производится локальное уточнение геометрии в областях перекрытия по контурным признакам.

На практике это означает, что на глобальном уровне устраняются основные геометрические рассогласования между фрагментом и шаблоном, а на локальном уровне выполняется коррекция остаточных искажений, краевых эффектов и несовпадений в областях перекрытия. Такое двухуровневое представление удобно и для

аналитического описания метода, и для его программной реализации [152]. Часть этой работы может входить в некоторую композицию или может быть реализована отдельно. Под композицией F_j будем понимать последовательность преобразований, выполняемых над изображением при его приведении к виду, пригодному для последующей регистрации и объединения с другими изображениями. В состав этой композиции могут входить операции внутренней калибровки камеры, коррекции искажений, глобального выравнивания и локального уточнения, то есть $F_j = F_j^{(n)} \circ F_j^{(n-1)} \circ \dots \circ F_j^{(1)}$, выполняемые последовательно для каждого устройства j .

В частности, внутри текущей модели композиции преобразований можно задать процесс внутренней калибровки устройства как матрицу K следующего вида:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

где f_x, f_y – фокальные длины по осям, выражаемые в пикселях, а c_x, c_y – координаты главной точки.

Также возможным является присутствие в исходных данных радиальных искажений (чаще всего проявляющихся в виде «бочковой» или «подушечной»), тогда шаг композиции, определяемый деформацией изображения-источника, выглядит следующим образом [153].

Для координат (x_d, y_d) искаженного изображений могут быть использованы следующие уравнения для получения нормализованных неискаженных координат (x_u, y_u) согласно прямой модели Брауна–Конради:

$$x_d = x_u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 x_u y_u + p_2(r^2 + 2x_u^2), \quad (2.12)$$

$$y_d = y_u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2y_u^2) + 2p_2 x_u y_u, \quad (2.13)$$

где $r^2 = x_u^2 + y_u^2$ – квадрат расстояния до центра изображения.

Для коррекции изображения решается обратная задача определения (x_u, y_u) по известным (x_d, y_d) , как правило, численным итерационным методом или с использованием предварительно вычисленной карты преобразования. Также важным может являться нормализация перспективы, если этот шаг позволяют выполнять вычислительные мощности мобильных устройств [154].

Еще одним этапом композиции может являться фильтрация или устранение шума, задаваемая в форме оператора как:

$$\Psi_{den}: I_i^{HR} \rightarrow I_i^{den,HR}, \quad (1.14)$$

где конечная форма Ψ_{den} зависит от определенной модели шума.

Именно такой композиционный подход применяется в данной диссертационной работе в рамках методики и алгоритме на этапах предварительной обработке и постобработки.

Когда известны взаимные позиции и ориентации МО в каждой точке съемки и сама основная точка съемки, к которой МО двигался, то можно скорректировать перспективные искажения, например, следующими способами:

- переводом одной плоскости изображения в другую (гомография) за счет применения матрицы гомографии H_i , учитывающей повороты, масштаб и смещения в анализирующей сцене;
- созданием ортогонального представления для фронтального выравнивания сцены.

Далее приводится более детализированное описание используемой в программной реализации процедуры выделения и описания ключевых точек.

Как уже говорилось выше, ключевые точки нужны для совмещения кадров с камеры каждого мобильного объекта в единое изображение высокого разрешения. В общем случае в рамках разрабатываемой модели для выявления точек интереса (ключевых) нужно сначала построить масштабно-инвариантное представление.

Полученные в пространстве экстремумы отражают потенциальные ключевые точки. Следовательно, необходимо выполнить поиск экстремумов путем исследования всех пикселей каждого разностного изображения и сравнения со своими соседями в трехмерной окрестности (то есть по пространству и масштабу) для поиска локальных максимумов и минимумов. Точное местоположение экстремумов может быть достигнуто путем применения более сложных алгоритмов и решений, например методов аппроксимации при помощи разложения Тейлора и так далее.

Множество полученных экстремумов, как правило, кроме корректных и истинных точек содержит еще и ложные. Поэтому необходимо в общий алгоритм

включить проверку на стабильность и значимость найденных точек с их ранжированием по этим параметрам. После этого обычно используется фильтрация по контрасту (то есть из множества исключаются точки с низкими контрастами, что позволяет считать их расплывчатыми или нечеткими) или проверка на кривизну, которая оценивается с использованием матрицы Гессе, при помощи которой можно исключить точки на прямолинейных границах.

Далее выполняется назначение ориентации ключевых точек. То есть сначала вокруг ключевой точки создается окно, в котором вычисляются ориентация и величина градиентов $m(x, y)$ как

$$\begin{cases} Hl(x, y) = \text{atan2}(L_{iy}(x, y), L_{ix}(x, y)), \\ m(x, y) = \sqrt{L_{ix}^2(x, y) + L_{iy}^2(x, y)}, \end{cases} \quad (2.15)$$

где L_x и L_y – это частные производные яркости изображения по координатам, показывающие изменение яркости по горизонтальному и вертикальному направлениям (компоненты градиента) такие что:

$$\begin{cases} L_{ix}(x, y) = \frac{\partial I_i^{pre}(x, y)}{\partial x}, \\ L_{iy}(x, y) = \frac{\partial I_i^{pre}(x, y)}{\partial y}. \end{cases} \quad (2.16)$$

После этого выполняется формирование дескрипторов D как вектора признаков, устойчивых к изменениям. Это итерационный процесс, повторяющийся для каждой ключевой точки в котором захватывается ее локальная область, область разделяется на меньшие подобласти, в которых составляются свои ориентации и величины градиентов. В завершении алгоритма дескрипторы нормализуются для уменьшения влияния изменения освещенности и других шумов и используются для сшивки изображений [150, 155].

2.2.7 Захват изображений и их обработка на МО

Захват и обработка изображений в системах со сканирующим МО представляет собой комплексную задачу, которая включает в себя сбор, обработку и анализ визуальных данных для выполнения задач, таких как навигация, мониторинг и анализ окружения [156–158].

На этапе захвата изображений существенными являются не только параметры получения кадра сами по себе, но и их влияние на устойчивость последующих этапов обработки: выделение ключевых точек, регистрация, оценка контуров и достижение критерия достаточности результирующего изображения.

В контексте настоящей работы параметры захвата имеют принципиальное значение не только для визуального качества кадра, но и для эффективного числа информативных пикселей, пригодных для последующей регистрации и сшивки. Тем самым этап получения данных напрямую связан с критерием аппаратной обеспеченности камеры и с условием достижения требуемого качества результирующего изображения, введенными в первой главе.

Первым этапом решения задачи является захват изображения с камер или с камеры, установленных на мобильном объекте. Здесь важную роль играют такие параметры, как разрешение снимка, время, требующееся на фокусировку и фиксацию изображения [159]. Также на качество изображения влияют такие факторы как экспозиция, фокус, баланс белого и так далее, входящие в модель камеры каждого МО [160].

Далее следует предобработка изображений как совокупность алгоритмов, работающих внутри цифровой схемы или видеопроцессора (например, выравнивание гистограммы, коррекция цветопередачи, фильтрация шума и корректировка оптических искажений [161]).

Модель изображения, получаемого с камеры и определенная в п. 2.2.1 данной диссертационной работы уточняется как:

$$I_i = f_{cam}(\Omega_{tar}, \pi_i, \kappa_i, t_i^{\text{exp}}, w_i), \quad (2.17)$$

где f_{cam} – функция камеры, π_i – поза (положение) камеры, k_i – набор параметров камеры, включая разрешение, фокусное расстояние и параметры калибровки, t_i^{exp} – экспозиция, а w_i – параметры баланса белого.

Такое представление важно в контексте первой главы, поскольку именно параметры камеры и характеристики формирования кадра определяют фактическое количество информативных пикселей, доступных для последующей регистрации. Следовательно, улучшение результирующего изображения в предлагаемом методе достигается не за счёт искусственного улучшения одного кадра, а за счёт рационального использования серии кадров, каждый из которых вносит локальную детализацию в результирующую сцену.

В случае постобработки изображения в камере или во встроенном программном обеспечении, модель дополняется как композиция

$$I_i^{\text{pre}} = \Phi_{\text{pre}}(I_i) = \Phi_n \circ \dots \circ \Phi_2 \circ \Phi_1(I_i), \quad (2.18)$$

где I_i^{pre} – предобработанный кадр, а Φ_i – это элемент процесса предобработки, например коррекция гистограммы, шумоподавление, коррекция искажений и так далее.

2.2.8 Сшивка изображений по полученным распределенным кадрам

Так как изображения от каждой точки сканирования у мобильного объекта считается условно нормализованными и обработанными, то коррекция в общем случае не требуется – остается выполнить только гомографию и совмещение.

Алгоритмы гарантируют совпадение вычисленных ключевых точек и дескрипторов на отдельных кадрах по отношению к общей матрице изображения для покрытия M^{req} [150, 154].

Поэтому, основной задачей является совместное слияние и построение мозаики по шаблонному кадру. С использованием найденных дескрипторов и ключевых

точек обычно выполняется объединение изображений в одно с применением дополнительных алгоритмов, а именно:

- сглаживание переходом между кадрами, например при помощи Laplacian pyramid blending [162];
- выравнивание швов, который может включать в себя коррекцию артефактов на стыках изображений и устранение дублирующих элементов.

В результате полученного интегрированного изображения получается целостное восприятие целевого кадра за счет формирования единого «информационного поля» и, в частности, за счет наложения полученной матрицы сшитого изображения на матрицу M^{req} [163].

Формально имеется набор подкадров, снятых относительно целевой точки с различных позиций как множество $I^{pre} = \{I_1^{pre}, I_2^{pre}, \dots, I_n^{pre}\}$. Далее каждое изображение приводится к общей системе координат с помощью матрицы гомографий H_i фрагментов [164]:

$$I_i^{warp}(p) = I_i^{pre}(\pi(H_i^{-1}\tilde{p})), p \in \Omega_i, \quad (2.19)$$

где H_i – матрица гомографии для i -го изображения, I_i^{warp} – изображение, преобразованное к общей системе координат, p – точка координатной системе опорного шаблона, для которой вычисляется значение преобразованного фрагмента в однородных координатах $\tilde{p} = (x, y, 1)^T$, $\pi([u, v, w]^T) = (\frac{u}{w}, \frac{v}{w})$, u, v – первые две однородные координаты точки в исходном i -м фрагменте, w – однородный масштабный коэффициент, а x, y – обычные двумерные координаты для которых верно $x_i = u/w$, $y_i = v/w$, $w \neq 0$.

Сшитое изображение I^{comb} формируется как функция объединения всех преобразованных подкадров I_i^{warp} при помощи I^{LR} , например, с использованием условной весовой маски $W_i(x, y)$ для нормализации переходов, тогда:

$$I^{comb}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n W_i(x, y) \cdot I_i^{warp}(x, y)}{\sum_{i=1}^n W_i(x, y)}, \quad (2.20)$$

где $W_i(x, y)$ – некоторая весовая функция.

В разработанном методе также предложено использовать анализ контуров как инструмент точного совмещения подкадров на основе морфологии данных.

После глобального совмещения на основе ключевых точек все равно остается некоторая остаточная ошибка, вызванная локальными искажениями сцены. Пусть $\mathcal{C}_T$ и $\mathcal{C}_i$ - множества контуров шаблона и соответствующего подкадра из снятой серии (в рабочем варианте можно, как уже говорилось выше, использовать детекторы Кэнни или Собеля [165]), проецируемых в область шаблона через область гомографии H_i . Для каждой граничной зоны между двумя подкадрами найденными в координатной сетке шаблона, введем функцию локальной деформации через расчет евклидова расстояния между скорректированной точкой контура фрагмента $p + u_i(p)$ и соответствующей точкой контура шаблона $q_i(p)$ следующего вида:

$$u_i^* = \arg \min_{u_i} [\sum_{p \in \mathcal{C}_i \cap \Omega_i^{ov}} \|p + u_i(p) - q_i(p)\|_2^2 + \lambda_r \mathcal{R}(u_i)], \quad (2.21)$$

где $\mathcal{R}(i)$ – некоторый регуляризатор, например гладкость смещения, λ_r – коэффициент регуляризации, Ω – область перекрытия, u_i – поле локального уточнения, $q_i(p)$ – точка контура шаблона $\mathcal{C}_T$, сопоставленная точке контура $p \in \mathcal{C}_i$, Ω_i^{ov} - область перекрытия i -го фрагмента с соответствующим участком шаблона. Процесс совмещения с контурным уточнением здесь фактически соответствует отображению исходной точки контура фрагмента p на точку p' после коррекции.

Результатом вычисления является поле смещений для коррекции u_i^* , применяемое к i -му фрагменту I_i^{warp} , ранее приведённому в систему координат опорного шаблона с помощью гомографии H_i :

$$I_i^{corr}(p + u_i^*(p)) = I_i^{warp}(p). \quad (2.22)$$

Данный шаг «доразмещения» по полю смещений позволяет устранить артефакты границ и повысить точность сшивки.

Следует учитывать, что формально итоговое изображение высокого разрешения строится как агрегат подкадров:

$$\begin{cases} I^{HR}(p) = \frac{\sum_{i \in \mathcal{S}(p)} w_i(p) I_i^{corr}(p)}{\sum_{i \in \mathcal{S}(p)} w_i(p)}, \\ \sum_{i \in \mathcal{S}(p)} w_i(p) > 0, \end{cases} \quad (2.23)$$

где $\mathcal{S}(p)$ – множество подкадров, покрывающих точку p уже в координатной сетке шаблона, определяемое как $\mathcal{S}(p) = \{i \in \{1, \dots, n\}: p \in \Omega_i\}$, $w_i(p)$ – весовой коэффициент i -го фрагмента в точке p , отражающий степень доверия к значению пикселя данного фрагмента при формировании результирующего изображения [166]. Если все фрагменты считаются одинаково надёжными, то $w_i(p) \rightarrow 1$, чем ближе точка к центру фрагмента, тем пиксели принимаются как более надёжные. В проводимых экспериментах и в программной модели $w_i(p)$ принимаются равными 1.

В данном случае агрегирование подкадров следует понимать как контролируемую суперпозицию, при которой вклад каждого фрагмента определяется не только его геометрическим положением, но и качеством регистрации, наличием перекрытия, выраженностью локальных признаков и согласованностью контуров. Поэтому итоговая мозаика не является простой суммой изображений: она формируется как результат отбора, выравнивания и согласования тех данных, которые действительно повышают информационную насыщенность соответствующих областей сцены.

Сформированное таким образом результирующее изображение должно удовлетворять условию достаточности, введённому в первой главе: совокупность фрагментов, их перекрытие и точность регистрации должны обеспечивать достижение требуемого эффективного числа информативных пикселей при допустимых временных и ресурсных затратах. Иными словами, итоговая сшивка рассматривается не только как процедура объединения изображений, но и как механизм реализации критерия аппаратной экономии камеры за счёт суперпозиции фрагментов.

Таким образом, в модели используется двухступенчатое совмещение: сначала через гомографию, полученную по ключевым точкам, затем уточнение через локальное деформирование по контурам. Это позволяет значительно повысить точность и целостность изображения при ограниченных вычислительных ресурсах.

В терминах формальной постановки первой главы это означает, что метод реализует переход от ограниченного по аппаратным возможностям одиночного

кадра к результирующему изображению, удовлетворяющему критерию достаточности за счёт контролируемой суперпозиции фрагментов и алгоритмической компенсации ошибок их взаимного положения.

Тем самым результирующее изображение формируется не как интерполяционное увеличение одного кадра и не как постфактум-улучшение одиночного снимка, а как агрегирование информативных фрагментов, каждый из которых вносит локальную детализацию в соответствующую область сцены. Это обеспечивает снижение требований к разрешающей способности одиночной камеры при сохранении возможности достижения требуемого эффективного качества результирующего изображения.

Такой принцип позволяет интерпретировать разработанный метод как способ алгоритмического замещения аппаратного роста разрешающей способности камеры. Если профессиональная камера обеспечивает требуемое число «честных пикселей» непосредственно за счёт оптики и сенсора, то в предлагаемом подходе это число достигается за счёт согласованного накопления фрагментов, их субпиксельного смещения, перекрытия и структурного уточнения по контурам.

В целом, разработанный метод обеспечивает улучшение качества формируемого изображения на основе шаблона низкого разрешения, сшивки по ключевым точкам и контурного уточнения в виде следующего процесса (см. Рисунок 2.1).

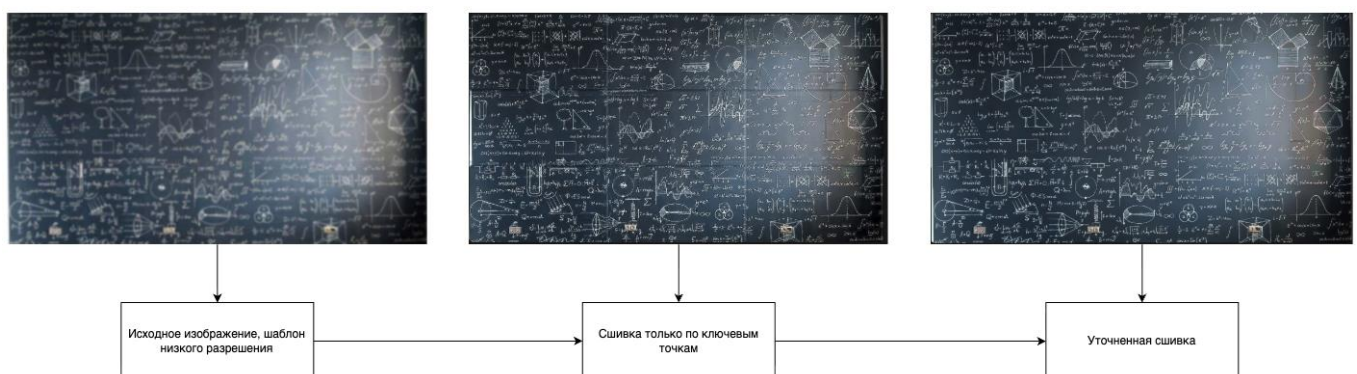


Рисунок 2.1 – Улучшение качества формируемого изображения при использовании разработанного метода

2.2.9 Обеспечение согласованности данных и устойчивости сшивки

Ключевым требованием является согласованность всех подкадров и устойчивость сшивания фрагментов. Для этого в рамках предлагаемого подхода используются следующие принципы:

1. Использование общего опорного шаблона и синхронизированных метаданных;
2. Совместная оптимизация параметров преобразований;
3. Балансировка ошибок совмещения с учётом локальных метрик качества.

Общий шаблон и синхронизация данных обеспечивают единое пространство отсчёта в рамках группы мобильных объектов. Опорный шаблон I_{ref} задаёт целевую геометрию сцены, а унифицированные параметры съёмки и метаданные (масштаб, разрешение, ожидаемое перекрытие) позволяют изначально ограничить диапазон допустимых преобразований. Это снижает вариативность решений при совмещении подкадров и уменьшает риск накопления ошибок.

Глобальное согласование параметров преобразований заключается в том, что параметры преобразований для отдельных подкадров (гомографии, сдвиги, масштабные коэффициенты) оцениваются не изолированно, а в рамках единой модели сцены. На этапе консолидации строится система взаимных связей между подкадрами, основанная на совпадающих признаках и контурных фрагментах. Далее выполняется согласованная настройка этих преобразований с целью минимизации суммарной ошибки совмещения по всей группе подкадров, а не только по парным соответствиям. Такой подход позволяет перераспределять локальные неточности и получать глобально согласованное решение.

Балансировка ошибок направлена на то, чтобы избежать концентрации геометрических и фотометрических искажений в отдельных областях изображения. В качестве критериев используются метрики качества (SSIM, PSNR, RMSE и Seam

Discontinuity Score). При превышении пороговых значений методика предусматривает корректировку параметров преобразований: частичный пересчёт гомографий, уточнение положения подкадров и, при необходимости, переразбиение сцены в проблемных областях. За счёт этого достигается более равномерное распределение ошибок по сцене и повышается устойчивость итоговой сшивки к локальным неоднородностям.

Применение перечисленных принципов позволяет обеспечивать согласованность данных и стабильное качество сшивки без введения специальных механизмов отказоустойчивости, оставаясь в рамках основной задачи обработки информации при формировании изображений высокого разрешения.

Если в экспериментальной среде используются несколько мобильных объектов, наличие единого шаблона позволяет изначально задать общую систему координат сцены и тем самым уменьшить накопление взаимных погрешностей. Это позволяет локально использовать алгоритмы оптимизации с заранее заданными параметрами и приближенными начальными оценками, известными еще раньше начала самого вычислительного процесса.

После сбора подкадров выполняется совместная оптимизация позиций фрагментов, добавление дополнительных связей и ограничений. Так как для начала работы, опять же, используется шаблон, то задача оптимизации формируется как единственная для всей системы, что гарантирует минимизацию суммарной ошибки всей группы, а распределение обработки на подкадры предотвращает накопление ошибок при последовательной сшивке, когда погрешность одного стыка накапливается при переходе к следующему. В настоящей главе данная процедура рассматривается только на уровне принципа согласованной коррекции, а детальная организация её распределённого исполнения относится к следующей главе.

При реализации предложенного подхода каждый подкадр сначала выравнивается относительно глобального шаблона или соседнего фрагмента, а затем выполняется глобальная корректировка совокупности подкадров. Такое двухэтапное выравнивание уменьшает накопление ошибок при последовательной сшивке и удобно для программной реализации как в однопоточном, так и в многопоточном

режиме. При использовании нескольких мобильных объектов данная схема может быть расширена за счёт параллельной обработки подмножеств фрагментов, однако вопросы координации таких вычислений выходят за рамки настоящей главы.

В результате совокупность перечисленных мер создаёт предпосылки для достижения требуемого качества изображения и для ускорения обработки при программной реализации, допускающей параллельное выполнение отдельных этапов. Экспериментальная проверка этих предпосылок приводится в последующих разделах диссертационной работы.

Устойчивость сшивки в рамках предлагаемого метода обеспечивается использованием единого опорного шаблона, который задаёт общую систему координат для всех фрагментов, а также применением двухэтапного механизма согласования: глобальной регистрации по ключевым точкам и локального уточнения по контурам. Такая схема уменьшает накопление ошибок при последовательном совмещении и повышает согласованность взаимного положения фрагментов даже при неоднородности исходных данных.

В рамках настоящей главы согласованность понимается прежде всего как геометрическая и структурная согласованность фрагментов в координатной системе шаблона. Вопросы распределения этих процедур между несколькими устройствами и согласования их частных результатов относятся к методике организации обработки информации и рассматриваются в следующей главе.

Выводы к главе 2

Во второй главе разработан метод обработки информации при формировании изображений высокого разрешения, являющийся конструктивным развитием постановки задачи, приведённой в первой главе.

Разработанный метод основан на использовании опорного шаблона низкого разрешения и совокупности частично перекрывающихся фрагментов высокого разрешения, объединяемых в единой системе координат сцены, позволяющий сформировать результирующее изображение высокого разрешения не за счёт использования аппаратных возможностей камеры мобильного устройства, а за счёт объединения фрагментов согласно предложенной модели, где каждое устройство вносит свою локальную детализацию в соответствующую область сцены с их последующим объединением и локальным уточнением.

Для полного описания этого процесса в рамках данной главы была выполнена формализация процесса обработки информации, в котором шаблон низкого разрешения I^{LR} , фрагменты $\{I_i^{HR}\}$ и области перекрытия $\{\Omega_i\}$ рассматриваются как взаимосвязанные матричные структуры, объединенные в композицию $\mathcal{E}$.

Такое формальное представление позволило свести взаимную регистрацию фрагментов $\{\Omega_i\}$ к определению пространственных преобразований $u(p)$, при которых они согласованно размещаются в пределах целевой области Ω_{tar} . Помимо этого, были введены вспомогательные формальные представления для последующего программного моделирования в рамках экспериментального исследования, оценки ресурсной выполнимости и описания динамики достижения областей съёмки.

Формирование результирующего изображения из согласованных фрагментов удовлетворяет введённому в первой главе диссертационной работы критерию достаточности K_{HW} за счёт увеличения эффективного числа информационно значимых пикселей N_{px}^{eff} без пропорционального повышения аппаратных требований к камере каждого MO_i . Во главе показано, что прирост качества достигается не искусственным синтезом общей детализации объединенного изображения I^{HR} , а объединением реально зарегистрированных участков сцены с их реальными параметрами N_i^{hon} . При достаточной доле перекрытия $\rho_{i,j}$, корректной регистрации и контурном уточнении увеличивается число «честных пикселей», сохраняющих метри-

чески значимую связь с геометрией объектов на каждом соседнем кадре композиции $\mathcal{E}$. Описанные представления и процедуры учитывают ограничения R по качеству, времени и ресурсам, сформулированные в первой главе, и служат основой последующей методики распределённой обработки информации одним мобильным объектом или группой $\mathcal{A}$.

Итогом второй главы является метод обработки информации, описывающий процесс $\mathcal{P}$, задающий группу преобразований, применяемых при формировании результирующего изображения высокого разрешения I^{HR} .

В следующей главе приводятся результаты разработки методики и алгоритма, а также описывается организационное распределение функций между несколькими мобильными устройствами, координация их действий и построение вычислительно-коммуникационной схемы.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ГРУППАМИ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

В данной главе диссертационной работы описывается разработанная методика и алгоритм организации обработки информации при формировании изображений высокого разрешения группами мобильных объектов. Необходимость такого перехода определяется результатами предыдущих глав и приводит к решению задачи распределённой реализации указанного метода, при которой отдельные этапы получения и первичной обработки фрагментов выполняются параллельно на нескольких мобильных объектах, а согласование и интеграция результатов осуществляются в рамках единой организационной схемы [167].

Под методикой организации обработки информации в настоящей работе понимается совокупность правил, условий и процедур, определяющих организацию выполнения разработанного во второй главе метода группой мобильных объектов. При этом под группой подразумевается множество, включающее один или более объектов. Методика задаёт состав исходных данных, организационную схему взаимодействия, порядок определения координирующих ролей, правила декомпозиции сцены и распределения фрагментов, степень параллелизма операций, а также условия контроля и перераспределения заданий при нарушении ограничений по времени, качеству и ресурсам.

Методика в данной диссертационной работе определяет, каким составом мобильных объектов выполняются операции, как между ними распределяются фрагменты и вычислительные функции, кто формирует общий план и интегрирует результаты, а также при каких условиях выбранная организация процесса считается допустимой. Алгоритм, рассматриваемый далее, представляет пошаговую реализацию положений методики с позиции отдельного участника группы.

В главе определяются принципы распределения задач между участниками съёмки, формализуются процедуры выбора координирующих ролей, описывается методика распределённой обработки информации и разрабатывается алгоритм

формирования изображения высокого разрешения в группе мобильных объектов [86, 168, 169].

3.1 Общие принципы организации обработки информации при формировании изображений высокого разрешения группами мобильных объектов

Цель методики состоит в организации выполнения разработанного во второй главе метода группой мобильных объектов, для уменьшения времени получения фрагментов и формирования изображения высокого разрешения за счёт параллельного выполнения независимых операций при $m > 1$. В случае $m = 1$ параллелизм реализуется на уровне совмещения операций получения фрагментов и их локальной обработки.

В групповой реализации отдельные этапы получения данных, предварительной обработки, выделения признаков, первичного совмещения и локального контурного анализа распределяются между несколькими устройствами, поэтому общий опорный шаблон низкого разрешения I^{LR} и согласованные требования и ограничения для параметров съёмки R задают единую основу для процесса $\mathcal{P}$ обработки на разных устройствах [170, 171].

В разработанной методике используется иерархически координируемая распределённая схема с выделением лидера и интегратора на протяжении всего цикла формирования изображения высокого разрешения I^{HR} . До начала планирования из состава группы доступных мобильных устройств $\mathcal{A}$ выбирается некоторый мобильный объект MO_i , выполняющий функции лидера. Он получает опорный шаблон I^{LR} , определяет схему покрытия сцены $\mathcal{E}$ и распределяет задания на съёмку и обработку. Само правило выбора лидера относится к организационной части методики и вычислительная процедура для выбора этой роли формализуется далее в данной главе диссертационной работе [172].

Если в определенных условиях перейти от одного мобильного объекта MO к группе $\mathcal{A}$, то целевая область съёмки фактически не меняется – отличается сам способ её формирования. Вместо последовательного получения набора кадров одним устройством MO требуемое покрытие создаётся совокупностью фрагментов $I_i^{HR} \rightarrow \Omega_i$, которые несколько участников группы формируют параллельно.

Организация процесса $\mathcal{P}$ определяется соотношением между числом доступных мобильных объектов m и числом фрагментов n , задаваемым схемой покрытия сцены $\mathcal{E}$ следующим образом.

- Первый сценарий: $m = 1$. единственный мобильный объект последовательно формирует опорный шаблон, получает все фрагменты, выполняет их обработку и формирует результирующее изображение. При этом данный мобильный объект одновременно выполняет функции лидера, исполнителя и интегратора.
- Второй сценарий: $1 < m \leq n$. Число мобильных объектов не превышает числа фрагментов, поэтому одному или нескольким устройствам может быть назначено более одного задания на получение фрагментов. Получение и локальная обработка фрагментов выполняются параллельно в пределах доступного числа устройств, а при необходимости - в несколько последовательных циклов. Методика определяет распределение заданий и порядок получения фрагментов с учётом взаимного расположения мобильных объектов, характеристик используемых камер, вычислительных возможностей и доступного энергетического ресурса.
- Третий сценарий: $m > n$. При превышении числа мобильных объектов над числом фрагментов каждый фрагмент может быть назначен отдельному исполнителю и получен в рамках одного параллельного цикла.

Далее, с точки зрения показателя «честных пикселей» K_{HW} переход к группе мобильных объектов означает, что требуемая измерительная информативность сцены $\mathcal{O}$ набирается не последовательной работой одной камеры, а параллельным получением фрагментов несколькими фоторегистрирующими подсистемами. При этом каждый участник группы вносит ограниченный, но метрически значимый

вклад в результирующее изображение, а общий эффект достигается за счёт согласованной суперпозиции этих вкладов в координатах единого шаблона с учетом имеющихся возможностей устройств Θ_k и их ограничений R .

В данном случае необходимо обеспечить:

- согласованную и совместную работу мобильных объектов, распределив задачи для обработки множества фрагментов $\{\Omega_i\}_{i=1}^n$;
- полноту покрытия сцены Ω_{tar} ;
- согласованность масштаба и разрешения подкадров;
- соблюдение ограничений R как минимум по времени захвата изображений и формирования результата, с учетом возможности снижения локальной вычислительной нагрузки на отдельные устройства.

Назначение методики состоит в выборе допустимой организационной конфигурации процесса, при которой совокупность фрагментов, получаемых и обрабатываемых участниками группы, обеспечивает формирование единого изображения высокого разрешения с выполнением ограничений по полноте покрытия, качеству совмещения, времени, энергетическим и вычислительным ресурсам. Неоднородность характеристик камер, текущего положения, вычислительной производительности и остаточного заряда мобильных объектов учитывается при формировании схемы покрытия и назначении заданий конкретным исполнителям.

Исходные данные D_{in} для методики можно описать следующим образом.

$$D_{in} = \langle \Omega_{tar}, \mathcal{A}, R, M^{req}, \rho_{min}, N_{px,req}^{hon} \rangle, \quad (3.1)$$

где Ω_{tar} , $\mathcal{A}$, R – определены моделью (1.1), M^{req} – требуемые значения показателей качества результирующего изображения, ρ_{min} – минимально допустимая доля перекрытия фрагментов, а $N_{px,req}^{hon}$ – требуемое число информационно значимых пикселей результирующего изображения. В качестве R как множества вводимых ограничений можно использовать множество введенных ранее параметров $\langle T_{form}^{max}, T_{cap}^{max}, \{B_k\}_{k=1}^m \rangle$.

То есть исходные данные, связанные с представлением сцены, формированием опорного шаблона, требованиями к перекрытию и обработкой фрагментов,

фактически были определены заранее в рамках описания метода во второй главе данной диссертационной работы. Разработанная методика учитывает не только состав группы $\mathcal{A}$, но и текущее состояние s_i каждого из устройств MO_i . То есть учитываются их роль r_i , координаты или позиция π_i , остаточный заряд E_k , вычислительную производительность, доступную память, пропускную способность каналов связи и допустимые роли участников, то есть его пригодность K_i , где i – это номер устройства в группе.

3.2 Особенности распределения задач между участниками съемки

После выбора лидера планируется групповой цикл формирования изображения в рамках процесса $\mathcal{P}$. Исходными данными служат целевая область съёмки Ω_{tar} , требования к информативности $N_{px,i}^{hon}$ и доле перекрытия фрагментов $\rho_{i,j}$, а также текущие характеристики устройств Θ_i , входящих в группу $\mathcal{A}$.

Схема покрытия Ω_{tar} и назначение фрагментов мобильным объектам MO_i рассматриваются как единая задача. Предварительно разделять область съёмки только по геометрическому признаку, без учёта характеристик исполнителей Θ_i , допустимо лишь для однородной группы устройств, что может отличаться от реальной ситуации. При разной разрешающей способности камер, пространственного положения устройств π_i , вычислительной производительности и остаточного энергетического ресурса E_i фрагменты одинаковой площади $I_i^{HR} \rightarrow \Omega_i$ могут формировать различную временную, вычислительную и энергетическую нагрузку для каждого MO_i .

В связи с этим, лидер одновременно определяет границы фрагментов, положения их получения, назначаемых исполнителей и порядок выполнения соответствующих заданий. Число привлекаемых устройств определяется после предварительной оценки требуемого числа фрагментов n . При $m = 1$ все фрагменты и их покрытия Ω_i формируются последовательно одним мобильным объектом. При $1 <$

$m \leq n$ каждому участнику назначается упорядоченное подмножество фрагментов. При $m > n$ все основные фрагменты могут быть получены в одном параллельном цикле. Дополнительные устройства из доступного множества $\mathcal{A}$ могут использоваться в зависимости от назначенной роли r_i для резервирования, повторной съёмки критических областей или не включаться в текущую конфигурацию группы $\mathcal{A}$.

Увеличение числа участников оправдано только в том случае, если ожидаемое сокращение времени получения и обработки превышает дополнительные затраты на координацию, синхронизацию и обмен данными.

Поэтому лидер формирует минимальную по составу допустимую группу, способную выполнить ограничения в соответствии с (1.5–1.8) и (1.12):

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{form}^{(m)} \leq T_{form}^{max}, \\ T_{cap}^{(m)} \leq T_{cap}^{max}, \\ N_{px}^{eff} \geq N_{px,ref}^{hon}, \\ \Omega_{tar} \subseteq \bigcup_{i=1}^n \Omega_i, \\ \rho_{i,j} \geq \rho_{min}, \forall (i,j) \in \mathcal{E}. \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Для каждого выбранного устройства дополнительно должны выполняться ограничения по доступному энергетическому ресурсу B_k , вычислительной производительности, памяти и каналу связи. Тем самым рациональное число участников определяется не только числом геометрических фрагментов, но и выполнимостью общего вычислительно-съёмочного цикла.

Распределение задач между MO_i выполняется в соответствии с шагами следующего процесса:

1. Шаг формирования параметров задачи распределения задач. Для каждого фрагмента Ω_i и каждого мобильного объекта MO_i , способного получить данный фрагмент I_i^{HR} , оцениваются затраты энергии на перемещение к заданной позиции съёмки и на получение и локальную обработку изображения E_i , прогнозируемое время выполнения задания, а также позиционное преимущество P_i . Параметры схемы покрытия $\mathcal{E}$, включая число фрагментов m , области их расположения $\{\Omega_i\}$ и

требуемую величину перекрытия $\rho_{i,j}$, определяются на основе метода, разработанного во второй главе данной диссертационной работы.

2. Шаг получения допустимого распределения снимков $\{I_i^{HR}\}$, то есть разбиение области съёмки на множество областей покрытия $\{\Omega_i\}$. На основе сформированной схемы покрытия, то есть композиции $\mathcal{E}$, матриц энергетических E и временных затрат T , а также позиционных преимуществ мобильных устройств P разработанный метод формирует матрицу назначения мобильных объектов, то есть их ролей $\{r_i\}$. Полученное решение обеспечивает назначение каждого фрагмента Ω_i конкретному исполнителю MO_i , соблюдение ограничений R по доступному энергетическому ресурсу и времени выполнения, а также соответствие характеристик камеры исполнителя требованиям R к получаемому фрагменту. При наличии нескольких допустимых решений предпочтение отдаётся варианту, обеспечивающему меньшие суммарные энергетические затраты и более равномерное распределение нагрузки между устройствами. Назначение фрагментов должно обеспечивать полное покрытие целевой области, выполнение требований по минимально допустимому перекрытию соседних фрагментов, достижение заданного эффективного числа информационно значимых пикселей и соблюдение временных и ресурсных ограничений каждого устройства. Среди допустимых назначений выбирается решение, минимизирующее время формирования результата, затраты на перемещение и дисбаланс остаточного заряда.

3. Шаг формирования задач на обработку данных для каждого из устройств MO_i с учетом их особенностей, создание необходимых метаданных процесса съёмки.

4. Шаг распределения информации между мобильными объектами MO_i . Каждому участнику передаются данные о его задаче, метаданные процесса съёмки, опорное изображение низкого разрешения I^{LR} .

При распределении задач необходимо учитывать следующие требования:

- вычислительный процесс $\mathcal{P}$ должен быть сбалансированным для всех мобильных объектов, то есть время решения задач на MO_i должно быть близким;

- зоны съёмки сшиваемых сегментов Ω_i и Ω_j должны пересекаться на достаточном уровне $\rho_{i,j}$, чтобы алгоритм совмещения подкадров обеспечивал высокое качество согласно метрикам качества $\mathcal{M}$;
- изображение низкого разрешения или шаблон I^{LR} должно содержать достаточно информации N_{px}^{eff} о требуемом расположении подкадров и их ориентации, что позволяет устройствам изначально снимать по согласованному плану и декомпозиции $\mathcal{E}$.

Сформированная совокупность оценок и ограничений передаётся известному методу дискретной оптимизации, решающему задачу назначения фрагментов мобильным объектам. В программной реализации для проведения экспериментального исследования был использован метод имитации отжига, согласно которому задаются матрицы энергетических затрат $E = [E_{ki}]_{m \times n}$, временных оценок $T = [T_{ki}]_{m \times n}$, позиционных преимуществ $P = [P_{ki}]_{m \times n}$, а также ограничения по доступному заряду, времени, характеристикам камеры и обязательному назначению каждого фрагмента.

Число мобильных объектов и фрагментов в рассматриваемых сценариях заведомо ограничено, поэтому оптимизационная задача ориентирована на поиск допустимого рационального распределения, а не на доказательство глобальной оптимальности. Используемый способ оптимизации не относится к научной новизне работы – он применяется исключительно как средство обработки данных.

По результатам распределения задач каждому устройству MO_i назначается частное задание. Оно содержит идентификатор фрагмента, область покрытия в координатах опорного шаблона I^{LR} , рекомендуемую точку позиционирования и направление съёмки, требуемое разрешение $W_i \times H_i$, долю перекрытия $\rho_{i,j}$, параметры локальной обработки, допустимое или максимальное время выполнения и формат возвращаемого результата. Предварительное согласование участка сцены и последовательность фрагментов в композиции $\mathcal{E}$ заведомо сокращает область поиска соответствий, уменьшает вероятность ложных совпадений и повышает устойчивость процесса регистрации.

3.3 Определение методики обработки информации в рамках задачи формирования изображений высокого разрешения в группе мобильных объектов

Разработанная методика задаёт порядок распределённой реализации этапов метода, изложенного в п. 2.1.1 и общий состав операций сохраняется. Методика изменяет не содержание процесса обработки – она описывает организацию его выполнения, то есть фактический состав участников из множества $\mathcal{A}$, распределение ролей r_k и заданий, выбор операций для параллельного исполнения, а также порядок передачи и интеграции частных результатов.

Основная цель методики состоит в сокращении общей продолжительности формирования изображения высокого разрешения I^{HR} за счёт параллельного выполнения независимых операций несколькими мобильными объектами $\{\Omega_i\}$. Основные этапы предложенной в диссертационной работе методики описаны ниже.

Этап 1. Планирование группового процесса.

1.1. Определение состава группы и выбор ролей.

Определяется множество доступных мобильных объектов и фиксируется их состояние: положение, характеристики камер, вычислительные возможности, доступный энергетический ресурс и параметры связи. Если устройств несколько, назначаются лидер и интегратор. Лидер координирует выполнение задания, интегратор формирует итоговое изображение; обе роли при необходимости может выполнять один мобильный объект.

1.2. Определение схемы покрытия сцены фрагментами высокого разрешения.

По размерам и координатам целевой области, характеристикам камер, требуемому перекрытию и заданному качеству результата определяются число фрагментов, их положение и точки съёмки. Этот шаг реализует предусмотренное методом построение схемы покрытия.

1.3. Формирование опорного шаблона низкого разрешения.

Один из мобильных объектов получает обзорное изображение низкого разрешения, задающее общую систему координат сцены. Исполнитель выбирается с учётом положения относительно точки обзорной съёмки. Если в системе работает единственное устройство, оно самостоятельно формирует шаблон и затем выполняет остальные операции.

1.4. Выбор сценария выполнения.

Сценарий определяется соотношением числа мобильных объектов m и числа фрагментов n . Если доступно только одно устройство – то именно оно получает и обрабатывает все фрагменты последовательно. Если же доступно несколько устройств $\{MO_i\}_{i \in 1..m}$, но их число m не превышает число фрагментов n , каждому участнику MO_i назначается один или несколько участков, а работа выполняется в несколько параллельных циклов. Когда устройств больше, чем фрагментов, каждому фрагменту может быть назначен отдельный обработчик, и весь набор кадров получают и локально обрабатывают за один параллельный цикл.

1.5. Распределение заданий.

Лидер назначает фрагменты с учётом положения π_i мобильных объектов MO_i , характеристик камер, требуемого времени, вычислительной нагрузки и энергетического запаса. Исполнителю передаются область ответственности в координатах шаблона, точка и направление съёмки, параметры получения фрагмента I_i^{HR} , требуемая площадь перекрытия.

1.6. Синхронизация участников.

До начала съёмки согласуются единое время запуска, параметры камер и форматы представления данных. Для этого применяются известные средства сетевой или спутниковой синхронизации, выбор которых зависит от аппаратных возможностей устройств.

Этап 2. Параллельное получение и локальная обработка фрагментов.

2.1. Выход мобильных объектов на позиции съёмки.

Участники группы параллельно перемещаются к назначенным точкам $\{\pi_i\}$. Если одному устройству поручено несколько фрагментов, оно последовательно проходит соответствующие позиции.

2.2. Получение фрагментов высокого разрешения.

Назначенные участки сцены регистрируются несколькими мобильными объектами $\{MO_i\}$ одновременно. Параллельный захват данных сокращает время формирования полного набора по сравнению с последовательной съёмкой одним устройством.

2.3. Предварительная обработка фрагментов.

Каждый мобильный объект локально подготавливает полученные изображения к последующей регистрации.

2.4. Глобальная регистрация фрагментов по ключевым точкам.

Для фрагментов параллельно выделяются ключевые точки $\{K_{p_i}\}$ и дескрипторы $\{D_{s_i}\}$, выполняется сопоставление с соответствующей областью опорного шаблона и оценивается геометрическое преобразование. После этого каждый фрагмент получает предварительное положение в общей системе координат.

2.5. Локальное уточнение взаимного положения по контурам.

На мобильных объектах параллельно выделяются контуры $\{C_i\}$ и формируются локальные данные для последующего согласования соседних фрагментов в рамках композиции $\mathcal{E}$. На этом шаге распределяется только локальная часть контурного анализа.

2.6. Передача промежуточных результатов.

Интегратору передаются параметры преобразований, ключевые точки, дескрипторы, контурные данные, оценки качества регистрации и сами фрагменты либо их предварительно преобразованные представления. Передача после локальной обработки уменьшает объём централизованных вычислений и исключает заведомо непригодные результаты.

Этап 3. Согласование и формирование итогового изображения.

3.1. Проверка полученных фрагментов.

Интегратор контролирует полноту набора, качество регистрации, величину перекрытия и пригодность каждого фрагмента.

3.2. Агрегирование фрагментов и формирование результирующего изображения.

В областях перекрытия сопоставляются контуры соседних фрагментов C_i и C_j и корректируется их взаимное положение. Эта операция не распределяется полностью между независимыми исполнителями. После локальной коррекции фрагменты объединяются в системе координат опорного шаблона I^{LR} , а итоговую композицию формирует интегратор, учитывающий все области перекрытия.

3.3. Оценка результата по критериям качества.

Проверяются значения заданных метрик качества M^{req} – в частности полнота покрытия, качество совмещения, отсутствие значимых разрывов и артефактов, требуемая информативность, а также соблюдение ограничений по времени и ресурсам. При выполнении критериев цикл завершается. В противном случае лидер корректирует распределение заданий либо параметры повторной съёмки отдельных участков.

Таким образом, предложенная методика сохраняет последовательность действий разработанного метода, но несколько изменяет способ ее организации. Такие артефакты как опорный шаблон, планирование процесса, межфрагментное согласование и окончательная интеграция закрепляются за назначенными участниками из группы $\mathcal{A}$, тогда как получение фрагментов I_i^{HR} , их предварительная обработка, выделение признаков, глобальная регистрация и локальная подготовка контурных данных могут выполняться параллельно.

Это сокращает время получения исходного набора подкадров и общую продолжительность обработки относительно последовательного подхода, реализуемого, согласно методу, на одном мобильном объекте.

Итого, научная новизна методики связана с организацией распределённой реализации разработанного метода - получение фрагментов высокого разрешения I_i^{HR} , первичная обработка и приведение фрагментов Ω_i к назначенным участкам общего шаблона I^{LR} выполняются отдельными исполнителями параллельно, а контурный анализ разделяется на локальную фазу у исполнителей и завершающую фазу у интегратора. Кроме того, определены правила выбора организационной конфигурации, совместного построения схемы покрытия и назначения фрагментов с учётом временных и ресурсных ограничений группы.

Для наглядного представления перехода от разработанного метода обработки информации к методике его распределённого исполнения в группе мобильных объектов далее приводится обобщённая схема процесса, отражающая состав этапов, их взаимосвязь и степень параллелизма отдельных операций.

При работе группы устройств также следует учитывать возможности синхронизации современных мобильных объектов для обеспечения таких ключевых моментов как единовременное начало съемки, компенсация выдержки камер и прочих задержек, а также выравнивание процессов обработки информации. В условиях доступности спутниковых систем навигации для МО, синхронизация обеспечивается протоколами GNSS-синхронизации времени такими как GNSS time synchronization, GPS-disciplined clock / GPSDO, PPS - Pulse Per Second, NMEA 0183 или IRIG-B, а в случае консервативной работы в локальной сети - NTP (Network Time Protocol), SNTP (Simple Network Time Protocol), PTP (Precision Time Protocol, IEEE 1588) или же IEEE 802.1AS / gPTP в зависимости от доступных аппаратных возможностей. При этом среднее время синхронизации от 10 нс для спутниковых систем до 0.1 мс по локальной сети, а время фиксации снимка или срабатывания затвора камеры составляет 50–300 мс [173]. То есть за время срабатывания камеры можно «синхронизировать» устройства от 100 до 100 тысяч раз, что делает возможным составление точного по времени срабатывания «ансамбля» устройств даже с учетом сетевых задержек. То же относится и к съемке динамичных сцен, когда изменение локальных объектов (например, движение) допускает стандартную фиксацию в 30–60 кадров в секунду, что соответствует 15–16 мс, что также гораздо дольше, чем процедура синхронизации устройств [174].

Обобщенная схема организации вычислительного процесса согласно разработанной методике показана на Рисунках 3.1–3.3.

Для оценки временного преимущества разработанной методики уточним выражение (1.7), введённое в первой главе. В отличие от укрупненной модели первой главы, компоненты времени захвата и обработки представляются в виде совокупности отдельных этапов, характеризующих особенности распределенного формирования изображения группой мобильных объектов.

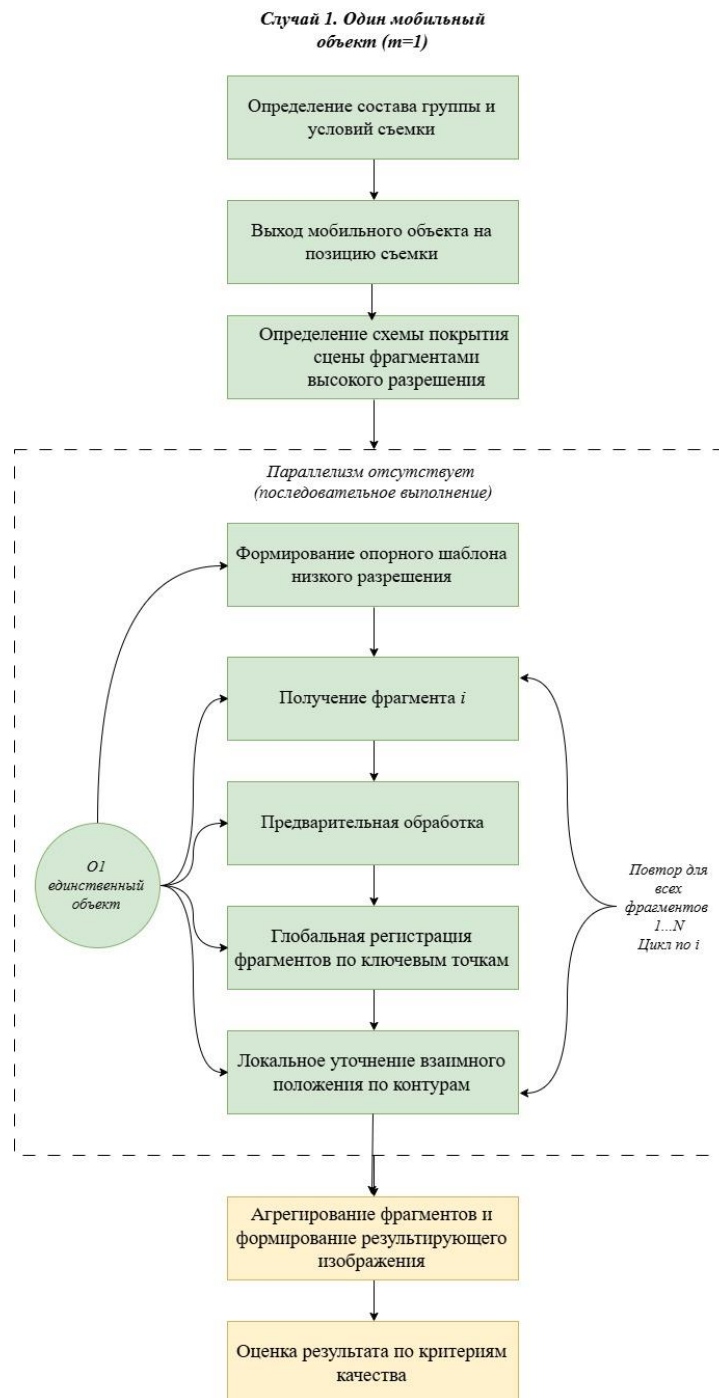


Рисунок 3.1 – Обобщенная схема решения задачи обработки информации для одного объекта, когда $m = 1$

В рамках групповой реализации составляющие времени захвата и обработки определяются продолжительностью работы наиболее загруженного мобильного объекта, тогда как время синхронизации учитывает накладные затраты на организацию совместного выполнения следующим образом с учетом возможности параллельного выполнения захвата подкадров, их локальной обработки и передачи интегратору:

$$T_{form} = T_{sync} + T_{mov_1} + T_{cpt} + T_{loc_n} + T_{trans_n} + T_{int}. \quad (3.3)$$

где T_{sync} - время синхронизации объектов, T_{mov_1} - время перемещения объектов к первой точке съемки, T_{cpt} - время захвата шаблона и подкадров, локальной обработки и передачи шаблона и подкадров от 1 до $n-1$, T_{loc_n} - время локальной обработки последнего подкадра, T_{trans_n} - время передачи последнего подкадра и его метаданных, T_{int} - время интеграции.

Случай 2. Число мобильных объектов меньше числа фрагментов
($1 < m \leq n$)

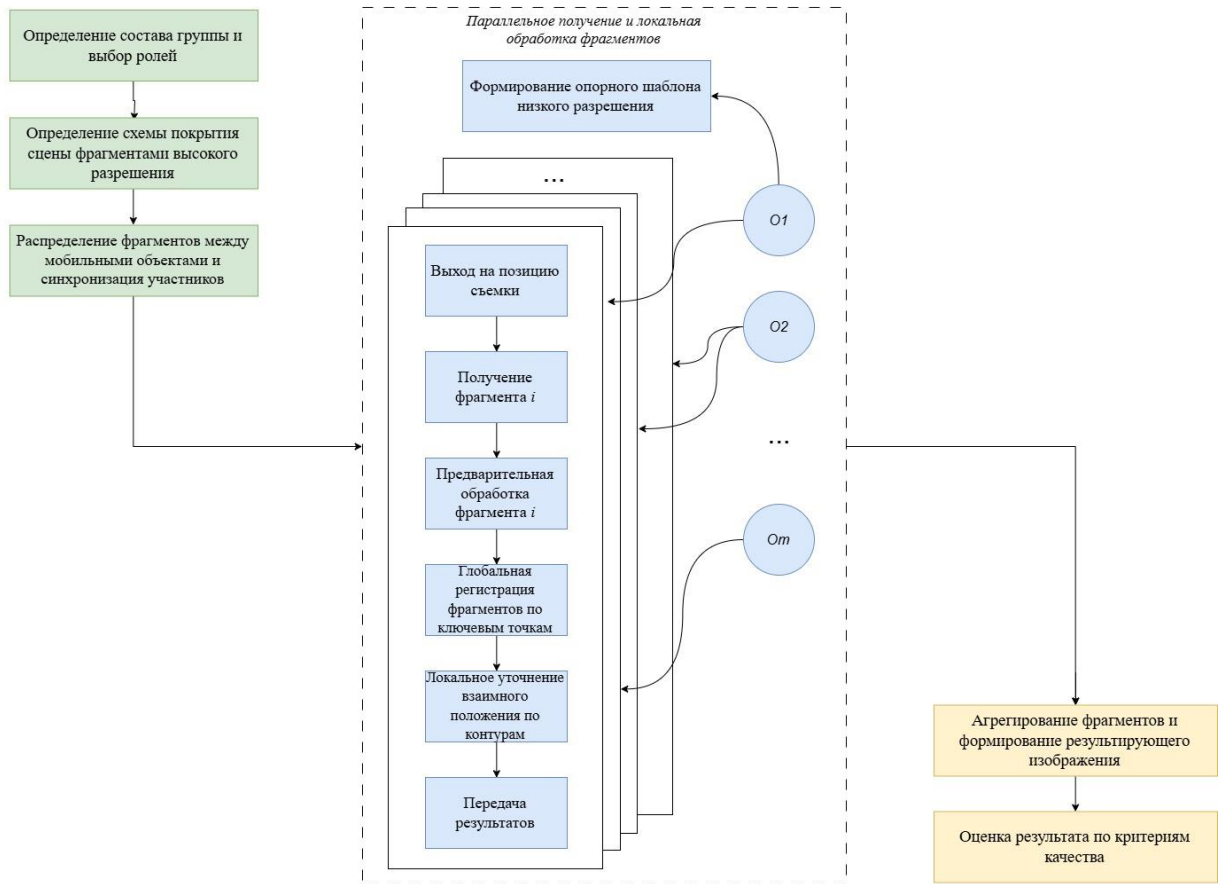


Рисунок 3.2 – Обобщенная схема решения задачи обработки информации для группы объектов, когда $1 < m \leq n$

С точки зрения синхронизации устройств, эта модель раскрывается как:

$$T_{sync} = T_{role} + T_{assign} + T_{param}, \quad (3.4)$$

где T_{role} - время распределения ролей мобильных объектов, T_{assign} - время распределения заданий, T_{param} - время согласования времени запуска, параметров съёмки и форматов данных.

Случай 3. Число мобильных объектов больше или равно числу фрагментов
 $m \geq n$

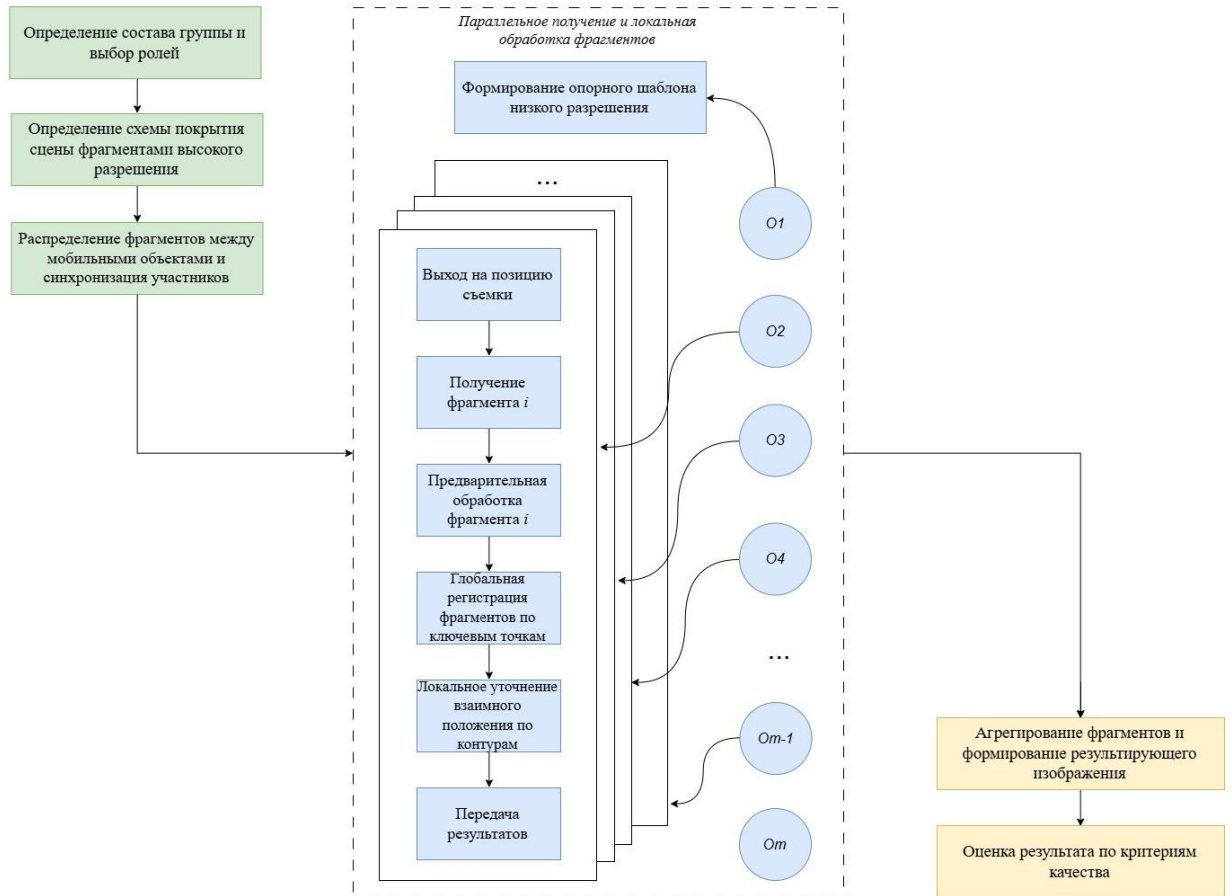


Рисунок 3.3 – Обобщенная схема решения задачи обработки информации для группы объектов, когда $m > n$

При этом, время захвата шаблона и подкадров для m объектов определим как интервал между началом съемки первого подкадра/шаблона и окончанием съемки последнего подкадра. В отличие от T_{cpt} , T_{cap} учитывает только длительность процесса съемки. С учетом выражения (1.8), для m объектов, время захвата можно определить как:

$$T_{cap}^{(m)} = \max_{k \in 1, \dots, m} \left(\max_{i \in S_k} T_{k,i}^{end} \right) - \min_{i \in 1, \dots, m} \left(\max_{i \in S_k} T_{k,i}^{start} \right). \quad (3.5)$$

где $T_{k,i}^{end}$ – это время завершения съёмки, а $T_{k,i}^{start}$ – время начала съемки.

1. Случай вырожденной до одного объекта группы (последовательная обработка, $m = 1$).

При использовании одного мобильного объекта все фрагменты получаются и обрабатываются последовательно, то есть:

$$T_{form}^{(1)} = T_{mov_1} + T_{cpt}^{(1)} + T_{loc_n} + T_{int}, \quad (3.6)$$

с учетом того, что синхронизация и передача информация фактически отсутствуют, время захвата определяется также, как в общей модели, $T_{cpt}^{(1)}$ – включает в себя время захвата шаблона и подкадров, локальной обработки и передачи шаблона и всех подкадров следующим образом:

$$T_{cpt}^{(1)} = \begin{cases} \sum_{i=2}^n T_{mov_i}, & \text{если } T_{mov_i} > T_{loc_i}, T_{mov_i} > T_{trans_i}, \\ \sum_{i=1}^{n-1} T_{loc_i}, & \text{если } T_{mov_i} < T_{loc_i}, T_{loc_i} > T_{trans_i}, \\ T_{loc_1} + \sum_{i=1}^{n-1} T_{trans_i}, & \text{если } T_{trans_i} > T_{loc_i}, T_{trans_i} > T_{mov_i}. \end{cases} \quad (3.7)$$

2. Случай группы (параллельное решение части задач, $1 < m \leq n$).

В таком случае каждому мобильному объекту a_k назначается множество фрагментов $\mathcal{S}_k$. Тогда устройства работают параллельно, поэтому время захвата определяется наиболее загруженным участником:

$$T_{form}^{(m)} = T_{sync} + \max_{k \in 1, \dots, m} (T_{mov_{1,k}} + T_{cpt_k} + T_{loc_{n,k}} + T_{trans_{n,k}}) + T_{int}. \quad (3.8)$$

Для одинаковых мобильных объектов со схожими характеристиками модель вырождается в следующую форму:

$$T_{form}^{(m)} \approx T_{sync} + T_{mov_1} + T_{cpt}^{(m)} + T_{loc_n} + T_{trans_n} + T_{int}, \quad (3.9)$$

с учетом того, что зависимость для $T_{cpt}^{(m)}$ включает в себя время захвата шаблона (при необходимости) и подкадров, локальной обработки и передачи шаблона и $\left\lceil \frac{n}{m} \right\rceil$ подкадров и определяется следующим образом для n_k – количество подкадров, назначенное k -му объекту:

$$T_{cpt}^{(m)} = \begin{cases} \sum_{i=2}^{n_k} T_{mov_i}, & \text{если } T_{mov_i} > T_{loc_i}, T_{mov_i} > T_{trans_i}, \\ \sum_{i=1}^{n_k-1} T_{loc_i}, & \text{если } T_{mov_i} < T_{loc_i}, T_{loc_i} > T_{trans_i}, \\ T_{loc_1} + \sum_{i=1}^{n_k-1} T_{trans_i}, & \text{если } T_{trans_i} > T_{loc_i}, T_{trans_i} > T_{mov_i}. \end{cases} \quad (3.10)$$

3. Случай группы с $m > n$.

В этом случае каждый фрагмент может быть назначен отдельному мобильному объекту. Поэтому все фрагменты получают и локально обрабатывают в одном параллельном цикле:

$$T_{form}^{(m)} = T_{sync} + \max_{i \in 1, \dots, m} (T_{mov_{1,i}} + T_{loc_{1,i}} + T_{trans_{1,i}}) + T_{int}, \quad (3.11)$$

с учетом того, что производится съемка только одного кадра устройствами, $T_{cpt} \rightarrow 0$.

Для одинаковых мобильных объектов со схожими характеристиками модель вырождается в следующую форму:

$$T_{form}^{(m)} \approx T_{sync} + T_{mov_1} + T_{loc_1} + T_{trans_1} + T_{int}. \quad (3.12)$$

Тогда очевиден эффект распределенной обработки информации, согласно предложенной методике, то есть параллельная обработка дает преимущество при $T_{form}^{(m)} < T_{form}^{(1)}$.

С учетом представленных выше формул (3.6), (3.8) и того, что $T_{cpt}^{(m)} \approx \frac{T_{cpt}^{(1)}}{m}$ можно сопоставить время формирования изображений для случаев 1 и 2 как:

$$T_{sync} + \frac{T_{cpt}^{(1)}}{m} + T_{trans_n} < T_{cpt}. \quad (3.13)$$

Тогда условие $T_{sync} + T_{trans_n} < T_{cpt}^{(1)} - \frac{T_{cpt}^{(1)}}{m}$ определяет целесообразность применения нескольких мобильных объектов для формирования изображений высокого разрешения в задачах прикладной фотограмметрии.

Для описанных выше случаев 1 и 3 (см. выражения 3.6 и 3.12), аналогичное сопоставление примет следующий вид:

$$T_{sync} + T_{trans_n} < T_{cpt}^{(1)}. \quad (3.14)$$

Следует отметить, что для случая $m > n$ величина T_{cap} будет определяться только рассинхронизацией моментов съемки и временем экспозиции камер, что обеспечивает возможность съемки динамичных сцен.

3.4 Разработка алгоритма формирования изображений высокого разрешения

Для реализации методики предполагается алгоритм как упорядоченная последовательность действий мобильного объекта, обеспечивающая реализацию ме-

тода второй главы и организационными правилами, заданными методикой в данной главе. Здесь следует упомянуть, что разработанный алгоритм не добавляет новых операций обработки изображений, не изменяет метод или методику, а задаёт практический порядок запуска, распределения, синхронизации, локального выполнения и последующей интеграции этапов, определённых методом, позволяя реализовать процесс обработки информации на практике в рамках экспериментального исследования.

Алгоритм также задаёт конкретный процесс информационного взаимодействия мобильных объектов – то есть между ними передаются только необходимые графические данные, предусмотренные методикой, и служебные сообщения.

Для этого используются организационные решения, сформулированные ранее. В частности: предварительное распределение областей съёмки, назначение ролей, общий шаблон низкого разрешения, локальная обработка без постоянного межустройственного согласования и последующая интеграция результатов.

Входными данными алгоритма являются описание сцены и области съёмки, состав и характеристики группы мобильных объектов, ограничения по времени, ресурсам и качеству, а также готовый опорный шаблон низкого разрешения либо данные для его формирования.

Выходными данными для алгоритма являются схема распределения ролей и задач, набор локально обработанных фрагментов с параметрами преобразований и итоговое изображение высокого разрешения, удовлетворяющее требованиям к качеству и согласованности.

Для алгоритма можно определить следующие положения и ограничения:

- предварительная координация устройств выполняется в начале работы;
- не требуется постоянное согласование между устройствами так как используется мультиагентный подход;
- общий шаблон низкого разрешения используется как основа для совмещения фрагментов;
- основная обработка данных может выполняться локально;

- в группе из нескольких устройств роли распределяются между участниками и в зависимости от числа доступных объектов и требуемого числа фрагментов;

- алгоритм применим как к одному мобильному объекту, так и к группе;
- состав операций метода обработки изображений сохраняется.

Алгоритм определяет последовательность выполнения операций процесса обработки информации для формирования изображения высокого разрешения и порядок взаимодействия каждого мобильного объекта с другими участниками группы в соответствии с разработанной методикой. Также алгоритм использует процедуру взаимодействия устройств, определённую методикой (раздел 3.3), но основная синхронизация достигается еще на этапе планирования за счет передачи единого шаблона и параметров [175] согласно мультиагентному подходу.

В результате исследования были выдвинуты следующие положения относительно метода управления мобильными объектами и организации их совместной работы:

- группа мобильных объектов заранее неизвестного размера так как мы определяем количество необходимых для решения задачи *МО* многокритериально, исходя из их доступности и возможностей;
- допускается динамическое изменение состава группы между последовательными сеансами в случае длительной работы;
- имеются ограниченные вычислительные ресурсы для каждого *МО*;
- подразумевается ограниченная пропускная способность каналов связи или возможные нарушения их работы;
- и, как следствие, отсутствие гарантированного устойчивого соединения;
- подразумевается необходимость обработки изображений непосредственно на мобильных устройствах;
- допускается отсутствие стационарной инфраструктуры.

В случае централизованного управления системой мобильных объектов центральный узел получает информацию практически от всех участников и объем передаваемых данных, как и нагрузка на каналы связи, гарантировано растет. Вся обработка информации, фактически, концентрируется в одном месте и, по мере роста числа МО, растут: очередь обработки, задержки, загрузка процессора центрального устройства, требуемый объем памяти и так далее. Так же централизация обработки требует передачи значительных объемов графической информации одному вычислительному узлу, а в случае выхода центрального устройства из строя или обрыв связи делает всю систему недоступной.

В результате именно центральный узел становится ограничивающим фактором производительности, определяя максимальное количество одновременно обслуживаемых устройств.

Кроме того, разработанный метод предусматривает выполнение большинства вычислительных операций непосредственно на мобильных объектах с последующей интеграцией локально сформированных результатов. Следовательно, применение централизованной схемы управления противоречит принципам реализации метода, поскольку требует концентрации вычислений в одном узле и постоянной передачи значительных объемов исходной информации. Поскольку разработанный метод основан на локальной обработке изображений каждым мобильным объектом и последующей интеграции полученных результатов, его практическая реализация требует применения мультиагентной организации взаимодействия. В такой системе каждый MO_i рассматривается как автономный агент, самостоятельно принимающий решения в пределах своей функциональной роли и взаимодействующий с другими агентами только при необходимости согласования промежуточных результатов и формирования итогового изображения.

Следовательно, основная цель разработанного алгоритма - реализовать процесс получения изображения высокого разрешения на основе шаблона (низкого разрешения), включающий этапы съёмки, разбиения, позиционирования, совмещения, анализа ключевых точек и контуров, а также адаптивной сшивки в мультиагентной среде в группе мобильных устройств.

На рисунке 3.4 представлена последовательность действий мобильного объекта MO_i в соответствии с его ролью r_i , реализующего разработанный метод обработки информации в соответствии с организационными правилами, установленными методикой. Алгоритм учитывает особенности функционирования устройства в различных ролях и обеспечивает выполнение всех этапов метода при сохранении ограничений, сформулированных в первой и третьей главах:

1. Единственный мобильный объект, на котором осуществляется съемка опорного изображения, формирование задачи, метаданных, а также процесс обработки информации и само по себе формирование изображения высокого разрешения.
2. Мобильный объект в составе группы, который реализует основной алгоритм, но находится под управлением лидирующего устройства при выдаче задания после декомпозиции опорного изображения и координат съемки.
3. Лидер группы, который формирует задание, метаданные, а также определяет интегратора, который собирает результирующее изображение высокого разрешения на основе данных, полученных от участников группы.

Следует также отметить, что в случае, когда формирование изображения высокого разрешения выполняется не одиночным мобильным объектом, а группой MO ($N > 1$), перед запуском основного алгоритма выполняется ряд подготовительных этапов, обеспечивающих согласованную работу участников.

Например, из участвующих устройств выбирается координатор, который отвечает за генерацию опорного шаблона, первичное разбиение сцены и синхронизацию остальных участников MO_i . Выбор лидера осуществляется в соответствии с формальной моделью, представленной в п. 3.5 настоящей главы, где пригодность мобильного объекта к выполнению координирующей роли оценивается по совокупности энергетического, вычислительного и позиционного критериев. Дополнительно могут учитываться правила приоритета, связанные с типом миссии и ролью лидера в вычислительном процессе. Например, остаточный заряд не во всех сценариях может быть определяющим фактором в выборе лидера. Если координирующее устройство почти не участвует в вычислительной обработке, большее влияние

на выбор роли может иметь его производительность и пространственное положение. Но когда на лидера возлагается также часть вычислений, вес энергетического критерия возрастает.

В обобщенном виде можно определить алгоритм как последовательность следующих действий:

- инициализацию группы и выбор ролей;
- формирование или передачу общего опорного шаблона;
- распределение зон ответственности;
- локальное получение и предварительную обработку подкадров;
- выделение признаков и оценку преобразований;
- обмен компактными промежуточными результатами;
- согласование частных решений;
- интеграцию и контроль качества итогового изображения.

Рисунок 3.4 дает представление о поведении системы в целом и о последовательности практических действий отдельного МО.

Работа алгоритма начинается с инициализации мобильного объекта и проверки наличия доступной миссии. При отсутствии назначенной миссии устройство продолжает ожидание.

После получения задания выполняется сбор информации о доступных вычислительных, энергетических и коммуникационных ресурсах, а также оценивается возможность выполнения поставленной задачи с учетом текущего состояния мобильного объекта.

При положительном результате оценки определяется режим функционирования системы. Если задача выполняется единственным мобильным объектом, формируется локальное задание, после чего реализуется алгоритм обработки информации и выполняется поиск необходимой области по шаблону на итоговом изображении.

При работе нескольких мобильных объектов определяется состав группы и назначаются функциональные роли участников. Лидер формирует общее задание,

распределяет области съемки между мобильными объектами и назначает интегратор. После получения индивидуального задания каждый исполнитель выполняет алгоритм обработки информации для закрепленной области.

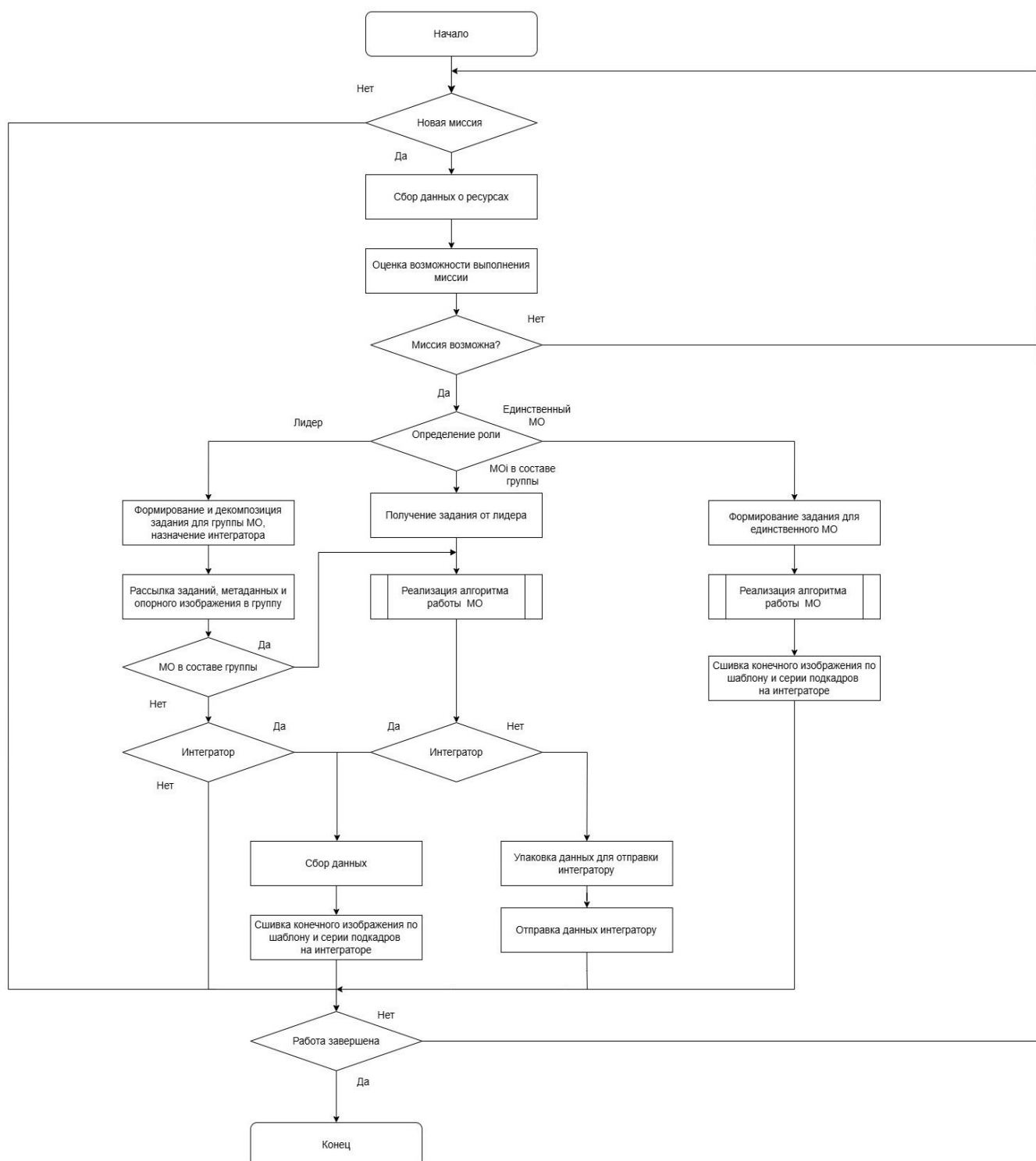


Рисунок 3.4 – Алгоритм работы мобильного объекта при формировании изображений высокого разрешения в группе

После получения индивидуального задания каждый исполнитель обрабатывает закреплённую за ним область в соответствии с алгоритмом.

Дальнейшие действия зависят от назначенной роли. Если устройство является интегратором, оно собирает результаты других участников, объединяет изображения и выполняет последующий поиск требуемой области. Остальные устройства упаковывают сформированные данные и передают их интегратору. После завершения локального цикла проверяется состояние текущей итерации: при необходимости продолжения мобильный объект возвращается к ожиданию нового запуска, а после выполнения всех операций работа завершается.

Алгоритм тем самым задаёт последовательность действий отдельного мобильного объекта при реализации метода в организационной схеме, установленной методикой. Состав вычислительных операций остаётся общим для всех участников; различия определяются ролями и проявляются в порядке выполнения координационных функций, обмена данными и интеграции результатов.

После определения последовательности действий мобильных объектов целесообразно оценить объем информационного обмена, возникающий при реализации разработанного алгоритма. В отличие от модели времени, рассмотренной в разделе 3.3, далее анализируется не продолжительность передачи данных, а суммарный объем информации, передаваемой между участниками группы. Такая оценка позволяет определить влияние количества мобильных объектов на нагрузку коммуникационной подсистемы и показать, что применение разработанной методики и алгоритма не приводит к пропорциональному увеличению объема передаваемых данных.

Таким образом, можно доказать, что разработанный алгоритм подтверждает следующее утверждение - при фиксированном требуемом разрешении итогового изображения объем передаваемой информации ограничен сверху и практически не зависит от числа мобильных объектов согласно проведенному в первой главе анализу, а именно утверждениям (1.2) – (1.6).

Введем параметр $\mathcal{I}_\Sigma$ как общий объем информации, передаваемой в процессе выполнения алгоритма. Тогда он складывается из объема шаблона низкого разрешения, передаваемого исполнителям перед началом обработки, объема результатов локальной обработки, передаваемых интегратору после завершения формирования подкадров, а также объема служебной информации, необходимой для организации взаимодействия мобильных объектов:

$$\mathcal{I}_\Sigma = \mathcal{I}_{tpl} + \mathcal{I}_{res} + \mathcal{I}_{srv}, \quad (3.15)$$

где $\mathcal{I}_{tpl}$ – объем шаблона низкого разрешения, $\mathcal{I}_{res}$ – суммарный объем результатов локальной обработки, а $\mathcal{I}_{srv}$ – объем служебной информации и метаданных.

Передача шаблона осуществляется однократно перед началом распределенной обработки и не зависит от количества мобильных объектов. Основной объем обмена формируется при передаче результатов локальной обработки интегратору. Пусть итоговое изображение, как и было определено в первой главе, должно содержать суммарно N^{hon} информационно значимых пикселей, определяемых требованиями к разрешению формируемого изображения, а средний объем данных, приходящийся на один пиксель после кодирования, равен q^{px} , тогда:

$$\mathcal{I}_{res} = q^{px} N^{hon}. \quad (3.16)$$

Однако для обеспечения устойчивой регистрации изображений соседние фрагменты формируются с частичным перекрытием. Обозначим относительную общую долю перекрытия через ρ в дополнение к доле перекрытия между фрагментами, причем величина ρ ограничивается требованиями разработанной методики и не превышает максимально допустимого значения ρ_{max} . Тогда выражение (3.16) принимает вид:

$$\begin{cases} \mathcal{I}_{res} = q^{px} N^{hon} (1 + \rho), \\ 0 \leq \rho \leq \rho_{max}. \end{cases} \quad (3.17)$$

Следует отметить, что увеличение количества мобильных объектов не приводит к увеличению числа информационно значимых пикселей итогового изображения. При изменении количества участников изменяется только распределение фрагментов между мобильными объектами, тогда как суммарное количество пере-

даваемых пикселей определяется исключительно требуемым разрешением итогового изображения и допустимой областью перекрытия. Иными словами, каждый участок итогового изображения передается интегратору только один раз, а дополнительный объем данных обусловлен лишь ограниченной областью взаимного перекрытия соседних фрагментов.

Помимо графической информации каждый мобильный объект передает служебные данные, содержащие параметры съемки, координаты, сведения о назначенной роли, идентификаторы фрагментов и другую информацию, необходимую для последующей интеграции результатов. Если объем служебной информации, передаваемой одним мобильным объектом, может быть сведен только к метаданным J_{meta} , то суммарный объем служебного обмена определяется выражением:

$$J_{srv} = mJ_{meta}, \quad (3.18)$$

где m – это количество мобильных объектов, участвующих в формировании изображения.

Объединяя выражения (3.17) и (3.18) в (3.15), получим:

$$J_{\Sigma} = J_{tpl} + q^{px} N^{hon}(1 + \rho) + mJ_{meta}. \quad (3.19)$$

Из выражения (3.19) следует, что при фиксированных требованиях к разрешению итогового изображения величины N^{hon} и ρ являются ограниченными и не зависят от количества мобильных объектов. Следовательно, основной объем передаваемой графической информации остается практически постоянным и определяется требованиями к качеству итогового изображения, а не числом участников распределенной обработки.

Тогда зависимость от количества мобильных объектов сохраняется только для служебной информации, объем которой возрастает линейно:

$$J_{srv} \ll q^{px} N^{hon}(1 + \rho). \quad (3.20)$$

Поскольку объем служебных сообщений существенно меньше объема графических данных, при увеличении количества мобильных объектов суммарный объем передаваемой информации изменяется незначительно и может быть представлен в виде:

$$J_{\Sigma} \approx J_{const} + mJ_{meta}. \quad (3.21)$$

где J_{const} – это рассчитанный заранее и зафиксированный неизменный предел объема передаваемых данных.

Таким образом, разработанная методика и алгоритм обеспечивает практически постоянный объем передачи графических данных при увеличении количества мобильных объектов. Это достигается тем, что суммарное число передаваемых информационно значимых пикселей определяется требуемым разрешением итогового изображения, а не количеством его фрагментов. Рост числа мобильных объектов приводит лишь к увеличению объема служебного обмена, необходимого для организации взаимодействия участников группы. Следовательно, при дальнейшем увеличении количества мобильных объектов снижение производительности системы обусловлено преимущественно ограничениями пропускной способности каналов связи и увеличением числа одновременно выполняемых сеансов передачи данных, а не ростом объема передаваемой графической информации.

3.5 Доработка формализованной модели с учетом определения лидера

Выбор лидера выполняется перед началом каждого цикла формирования изображения и предшествует декомпозиции сцены и распределению заданий. Лидер отвечает за получение опорного шаблона, построение общего плана покрытия, назначение заданий исполнителям и контроль выполнения ограничений. Поскольку пригодность устройства к этой роли определяется не одним параметром, выбор лидера формулируется как многокритериальная задача, учитывающая энергетический ресурс, вычислительные возможности и позиционное преимущество относительно точки получения шаблона [19].

Первый критерий характеризует доступный энергетический ресурс устройства. Энергетический запас может измеряться в джоулях или в процентах от максимального заряда, если известен расход на основные операции. Большой запас энергии позволяет устройству дольше оставаться активным и, при необходимости,

совмещать функции лидера и «линейного» мобильного объекта, участвующего в съёмке и обработке. При этом в общем случае уровень заряда не является безусловно приоритетным критерием: он становится определяющим именно в тех сценариях, где лидер активно участвует в вычислениях и выполнении задач наряду с другими устройствами.

Второй критерий отражает совокупные вычислительные возможности устройства: тактовую частоту, количество ядер, объём доступной памяти и т. п. Высокие вычислительные ресурсы особенно важны в тех миссиях, где лидер выполняет значительную часть обработки данных или на него, возлагаются функции интегратора, включая финальную сшивку изображения высокого разрешения. В таких случаях вес вычислительного критерия в общей функции пригодности может быть увеличен.

Третий критерий - позиционное преимущество - описывает, насколько выгодно текущее положение устройства для выполнения лидерских задач. В простейшем случае он может оцениваться через расстояние от текущего положения до целевой области или опорной точки сцены; при этом более выгодное (геометрически центральное или близкое к шаблону) расположение даёт устройству больший вклад в общий коэффициент пригодности. Такой критерий становится особенно важным, когда требуется минимизировать время выхода на стартовые позиции и объём перемещений, либо когда часть устройств находится слишком далеко и их задействование нецелесообразно.

Далее для каждого мобильного объекта вводится коэффициент пригодности K_i вычисляемый как взвешенная комбинация нормированных значений указанных критериев (энергия, вычислительные ресурсы, позиционное преимущество). Весовые коэффициенты $\alpha_E, \alpha_C, \alpha_P$ задают относительную важность каждого фактора и выбираются в зависимости от типа миссии и роли лидера в вычислительном процессе. Выбор лидера сводится к нахождению объекта с максимальным значением коэффициента пригодности K_k . Аналогичным образом может определяться и

устройство-интегратор: при этом используются те же критерии, но с другим набором весов (например, с повышенным приоритетом вычислительных возможностей и меньшим весом позиционного фактора).

В настоящей работе рассматриваются типовые сценарии, в которых продемонстрировано, как изменение весов позволяет получать разные конфигурации выбора лидера и интегратора в зависимости от числа доступных устройств, характера миссии и того, участвует ли лидер непосредственно в съёмке и обработке или выполняет преимущественно координирующие функции. Более сложные варианты постановки задачи выбора лидера (учёт истории нагрузок, количества миссий, выравнивание заряда по группе и т. п.) выходят за рамки данной диссертации и могут рассматриваться в дальнейшем как отдельное направление исследований, в рамках предлагаемого подхода и согласно разработанным методу и методике, выбор лидера рассматривается как многокритериальная задача, в которой учитываются энергетический ресурс, вычислительные возможности и позиционное преимущество устройства. Это позволяет разработать алгоритмы и адаптировать решение под различные типы миссий и режимов участия лидера в работе группы.

Для каждого мобильного объекта MO_i вводятся нормированные оценки основных критериев:

1. $E_k \in [0,1]$ – оценка энергетического ресурса, характеризующая доступный запас энергии устройства относительно максимально возможного значения (например, по текущему уровню заряда аккумулятора или прогнозу оставшегося времени работы);
2. $C_k \in [0,1]$ – оценка вычислительных возможностей, учитывающая тактовую частоту, количество ядер, объём памяти и другие параметры, влияющие на скорость обработки данных;
3. $P_k \in [0,1]$ – оценка позиционного преимущества, отражающая выгодность текущего положения устройства относительно области интереса или опорного шаблона (например, на основе расстояния до целевой зоны, центральности в группе и доступности каналов связи).

В простейшем случае нормировка может быть линейной: текущие значения параметров делятся на максимум по группе или на заданное эталонное значение.

$$K_k^{lead} = \alpha_E E_k + \alpha_C C_k + \alpha_P P_k, \quad (3.22)$$

где $\alpha_E, \alpha_C, \alpha_P$ – это весовые коэффициенты, задающие относительную важность энергии, вычислительных ресурсов и позиционного преимущества соответственно, а E_k – нормированная оценка энергетического ресурса, C_k – нормированная оценка вычислительных возможностей, $P_k = \{p_1, \dots, p_m\}$ – нормированная оценка позиционного преимущества устройства, при этом его можно определить по следующей формуле на основе расстояния от текущего местоположения до цели [141 – 143].

$$\begin{cases} d_k = \|\pi_k - \pi_k^{tar}\|_2, \\ p_k = 1 - \frac{d_k - d_k^{\min}}{d_k^{\max} - d_k^{\min} + \varepsilon}, \end{cases} \quad (3.23)$$

где π_k – текущее положение объекта, π_k^{tar} – целевая позиция или центр целевой области, d_k – расстояние от объекта до цели, $d_k^{\min} = \min_k d_k$, $d_k^{\max} = \max_k d_k$, а $\varepsilon > 0$ – малая поправка.

Как правило, веса нормируются условием:

$$\begin{cases} \alpha_E + \alpha_C + \alpha_P = 1, \\ \alpha_E, \alpha_C, \alpha_P \geq 0, \end{cases}, \quad (3.24)$$

что позволяет интерпретировать их как доли вклада соответствующих факторов в общий критерий пригодности.

Выбор лидера сводится к нахождению устройства с индексом (номером) k^* , для которого коэффициент K_k^{lead} максимален [144– 146]:

$$k^* = \arg_{k \in \{1, \dots, m\}} \max K_k^{lead}. \quad (3.25)$$

Такая модель позволяет назначать координирующее устройство не по одному параметру, например уровню заряда, а с учётом совокупности энергетических, вычислительных и позиционных характеристик группы.

При этом подчёркивается, что энергетический ресурс E_k – не является универсально приоритетным критерием. В сценариях, когда лидер активно участвует в съёмке и локальной обработке наравне с другими устройствами, значение α_E мо-

жет быть увеличено, так как от запаса энергии зависит устойчивость функционирования всей группы. В ситуациях, когда лидер выполняет преимущественно координирующие функции и основная нагрузка переносится на другие устройства, приоритет может смещаться в сторону вычислительных возможностей (α_C) или позиционного преимущества (α_P), обеспечивающего сокращение времени выхода на рабочие позиции и снижение объёма передаваемых данных. В миссиях, ориентированных на максимизацию числа последовательно выполняемых задач одной и той же группой устройств, веса могут быть выбраны так, чтобы способствовать более равномерному использованию энергетических ресурсов и выравниванию нагрузки между объектами.

Аналогичным образом определяется устройство-интегратор, на которое возлагаются функции консолидации локальных результатов и формирования итогового изображения высокого разрешения. Для него используется тот же тип критерия пригодности, но с иным набором весов α_E , как правило, с повышенным приоритетом вычислительных возможностей и, при необходимости, позиционного фактора.

Таким образом, единая формализованная модель выбора лидирующих ролей позволяет согласовать этапы алгоритмической обработки с особенностями конкретной миссии и конфигурации группы мобильных объектов, обеспечивая прозрачную настройку критериев без жёсткой привязки к одному параметру, например уровню заряда. Введённая модель выбора лидера и интегратора на основе совокупности энергетических, вычислительных и позиционных критериев является составной частью предлагаемого алгоритма и определяет механизм распределения ролей в группе мобильных объектов на начальном этапе формирования изображения.

Описанные выше доработки соответствуют принципам мультиагентного взаимодействия по децентрализованной схеме.

3.6 Процедура формирования фрагмента изображения высокого разрешения на одном устройстве из группы

Цель данной процедуры - реализовать процесс получения и обработки информации при формировании изображений высокого разрешения на одном мобильном объекте, являющемся участником группы, в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, с учётом формализованной модели изображения, структуры шаблона и морфологических операций. Процедура обеспечивает локальное формирование HR-изображения, используя шаблон низкого разрешения, с учётом возможности последующей интеграции в общее изображение группы МО.

По существу, данная процедура представляет собой локальную реализацию тех этапов метода второй главы, которые могут быть выполнены на отдельном устройстве автономно: получение подкадров, их предобработка, выделение признаков, локальное совмещение с опорным шаблоном и подготовка результата к последующей интеграции в общее изображение группы.

Процедура начинается с движения мобильного объекта МО к координатам съёмки, полученным от лидирующего устройства. После получения параметров задачи, включая целевую позицию и параметры съёмки, устройство перемещается в заданную точку и производит ориентацию на целевой фрагмент сцены. Ориентация может осуществляться как по инерциальным датчикам, так и по визуальным меткам, при наличии таковых.

Следующим шагом является получение изображения низкого разрешения, которое служит локальной опорной основой для привязки фрагментов высокого разрешения. Изображение преобразуется в матричную форму с сохранением цветовой информации, а также используются параметры съёмки, переданные в составе шаблона. Это обеспечивает согласованность локальной обработки с глобальной системой координат.

Далее производится захват подкадров высокого разрешения I_i^{HR} . В соответствии с рассчитанными координатами и параметрами съёмки, устройство MO_i пошагово выполняет одну или несколько съёмок целевых участков. При этом обеспечивается поддержание постоянных условий фокусировки и экспозиции. Каждое изображение сопровождается метаинформацией такой как координаты точки съёмки, угол обзора, временная метка и уникальный идентификатор снимка.

Затем может быть выполнена локальная предобработка полученных фрагментов. Включаются операции калибровки камеры (при наличии искажений), преобразование цветового пространства (если требуется), а также нормализация яркости и контрастности относительно эталонного шаблона. При необходимости кадры могут быть обрезаны до заданного размера и приведены к нужному уровню перекрытия с другими подкадрами.

После предобработки выполняется выделение ключевых точек и контуров. Применяются алгоритмы обнаружения признаков, такие как SIFT, ORB или FAST, дополнительно проводится морфологический анализ границ объектов с использованием градиентных или контурных методов (например, Canny). Результатом обработки является карта контуров с дескрипторами, пригодными для последующего сопоставления.

Затем фрагменты локально совмещаются с шаблоном низкого разрешения. Для каждого подкадра рассчитывается матрица преобразования, как правило гомография, найденные соответствия фильтруются, например методом RANSAC, после чего изображение приводится к координатной системе шаблона I^{LR} - благодаря этому положение фрагмента в общей структуре шаблона низкого разрешения определяется ещё на устройстве.

После завершения локальной обработки каждое устройство MO_i сохраняет подготовленный фрагмент высокого разрешения $I_i^{HR} \rightarrow \Omega_i$ и передаёт его ведущему устройству для глобального объединения Ω_{tar} . Одновременно обновляется локальная база параметров и синхронизируются метаданные онтологической конфигурации группы: положения устройств, шаблоны, маски, параметры съёмки и взаимные преобразования.

Схема реализации процедуры обработки информации на мобильном объекте представлена ниже на Рисунке 3.5. При работе группы мобильных объектов $\mathcal{A}$ описанная локальная процедура запускается после получения от координирующего устройства задания, параметров съёмки и соответствующего фрагмента опорного шаблона I^{LR} . Если же используется единственный мобильный объект, те же шаги выполняются в централизованном режиме без внешнего распределения ролей. Тем самым процедура, изложенная в настоящем подразделе, является инвариантной по отношению к числу участников и задаёт локальный алгоритмический цикл формирования и обработки фрагмента изображения.

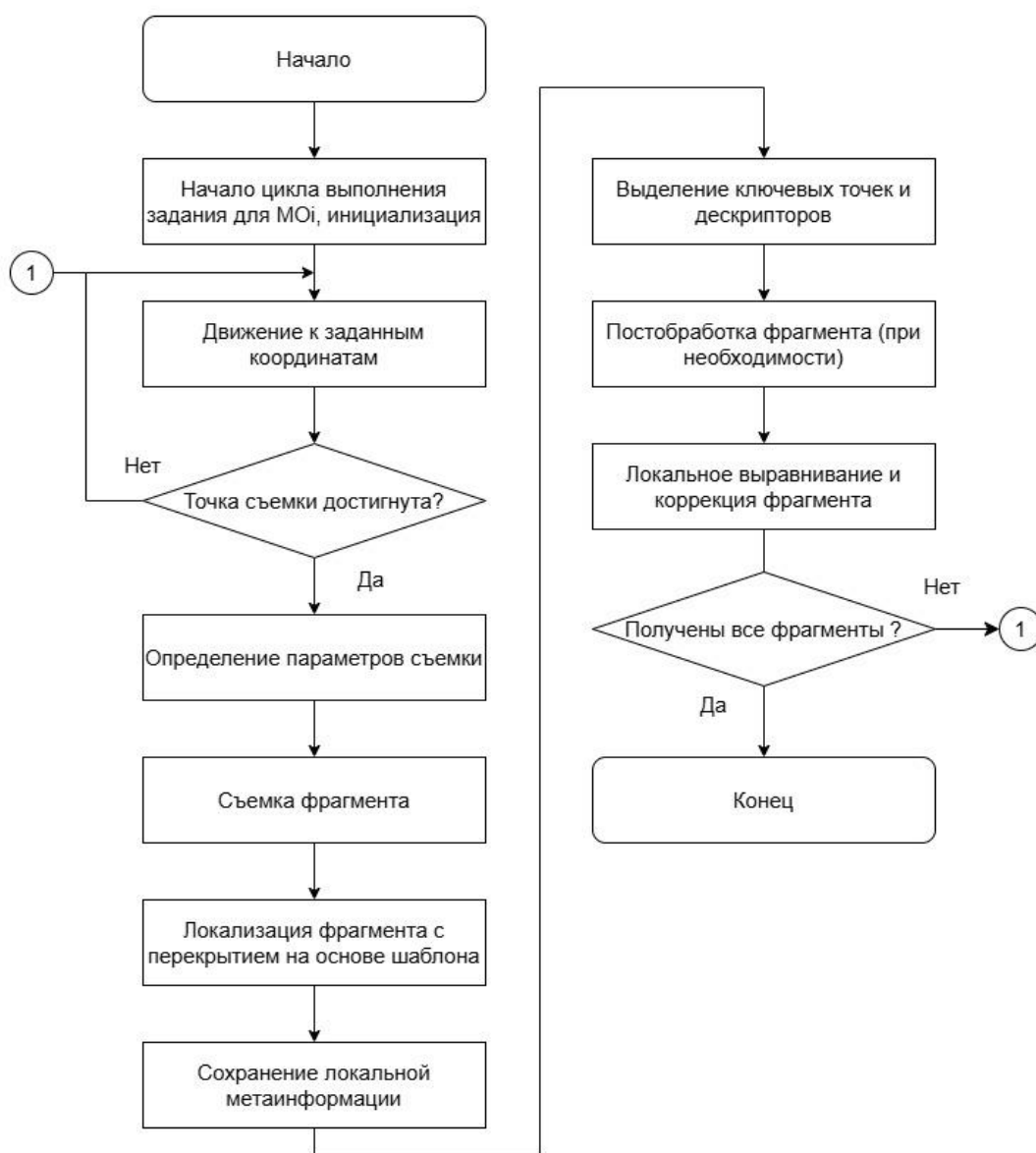


Рисунок 3.5 – Схема реализации процедуры обработки информации на мобильном объекте

Выводы к главе 3

В данной главе получено два фундаментальных результата. Во-первых, разработана методика организации обработки информации при формировании изображений высокого разрешения группами мобильных объектов, являющаяся развитием метода, предложенного во второй главе, в направлении его распределённой реализации. В отличие от метода, задающего состав и последовательность операций обработки, методика определяет порядок распределения этапов между участниками группы, распараллеливание получения фрагментов высокого разрешения и их первичного совмещения с участками шаблона низкого разрешения, а также частичное распараллеливание этапа анализа контуров. Разработанная методика отличается тем, что предусматривает распределенное выполнение этапов получения и локальной обработки фрагментов изображения с последующей интеграцией результатов. В соответствии с разработанными моделями времени и информационного обмена это обеспечивает сокращение времени формирования изображения за счет параллельного выполнения операций, при этом суммарный объем передаваемых графических данных определяется требуемым разрешением итогового изображения и практически не зависит от количества мобильных объектов.

Использование общего шаблона I^{LR} , согласованных параметров съёмки, распределённых зон ответственности и поэтапной интеграции промежуточных результатов уменьшает накопление ошибок позиционирования фрагментов, повышает устойчивость сшивки и снижает локальную вычислительную нагрузку. Полученные положения соответствуют ограничениям по времени, ресурсам и устойчивости результата, сформулированным в первой главе.

В третьей главе последовательно рассмотрены принципы распределённой организации обработки информации. На основе предложенных метода и методики разработан алгоритм, учитывающий ограничения по времени формирования результата, вычислительным затратам, энергопотреблению и полноте покрытия це-

левой сцены. Его вычислительная часть сохраняет преемственность с методом второй главы, а распределение функций между участниками соответствует методике организации взаимодействия, изложенной в третьей главе.

Алгоритм описывает действия для одного мобильного объекта группы. Он реализует полный вычислительно-съёмочный цикл на одной платформе и включает оптимизацию параметров съёмки, динамическое позиционирование, последовательное получение фрагментов и их адаптивное объединение относительно опорного шаблона с использованием морфологического представления данных и расчёта геометрических преобразований.

Разработанные в данной главе методика и алгоритм создают основу для программной реализации и экспериментальной проверки.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В предыдущих главах разработаны метод обработки информации при формировании изображений высокого разрешения с использованием мобильного объекта, а также методика и алгоритм распределённой обработки группой мобильных объектов. Определены этапы формирования изображения по опорному шаблону низкого разрешения, регистрации по ключевым точкам и уточнения по контурам; рассмотрены распределение заданий между участниками съёмки и порядок их взаимодействия. Эти положения положены в основу эксперимента, предназначенного для проверки полученных теоретических и практических результатов.

В данной главе проводится экспериментальная проверка достоверности выдвинутых гипотез, разработанного метода, методики и алгоритма, причем выполняется проверка как базового алгоритма со сшивкой по ключевым точкам, так и сшивка с дополнительным анализом и совмещением контуров (контурно-фотометрическое уточнение).

4.1 Постановка задачи и методика проведения эксперимента

4.1.1 Методика проведения экспериментального исследования

Экспериментальная проверка полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Постановка задачи эксперимента и воссоздание реальных условий съёмки объектов камерами мобильных устройств.
2. Проверка работоспособности разработанного метода при формировании изображений высокого разрешения.

3. Проверка устойчивости разработанного метода к воздействиям различной деструктивной природы на исходные изображения.

4. Проверка работоспособности методики и алгоритмов формирования изображения высокого разрешения группой мобильных объектов, а также оценка временных затрат на решение поставленных задач.

В общей схеме проведения эксперимента рассматриваются два режима реализации.

В первом режиме выполняется проверка вычислительного ядра разработанного метода при использовании одного мобильного объекта либо одного потока последовательно получаемых фрагментов, а также формируется опорное изображение низкого разрешения, затем получают набор частично перекрывающихся фрагментов высокого разрешения и обрабатывают их в соответствии с разработанным методом.

Во втором режиме программно моделируется распределённый сценарий, соответствующий методике третьей главы. Целевая область разбивается на отдельные фрагменты, задания назначаются моделям мобильных объектов, после чего связанные с ними наборы входных данных обрабатываются параллельно. Непосредственная съёмка несколькими физическими камерами в данном эксперименте не выполняется; временные и энергетические затраты этого этапа задаются параметрическими моделями согласно схеме на Рисунке 4.1.

Для воспроизведения основных функциональных характеристик и параметров поведения мобильного объекта используется программная модель вычислительно-съёмочного цикла. Её обобщённая структура представлена на Рисунке 4.2. В состав входят программное ядро взаимодействия компонентов и библиотека алгоритмических средств, отдельные процедуры которой включаются или отключаются конфигурационными параметрами.

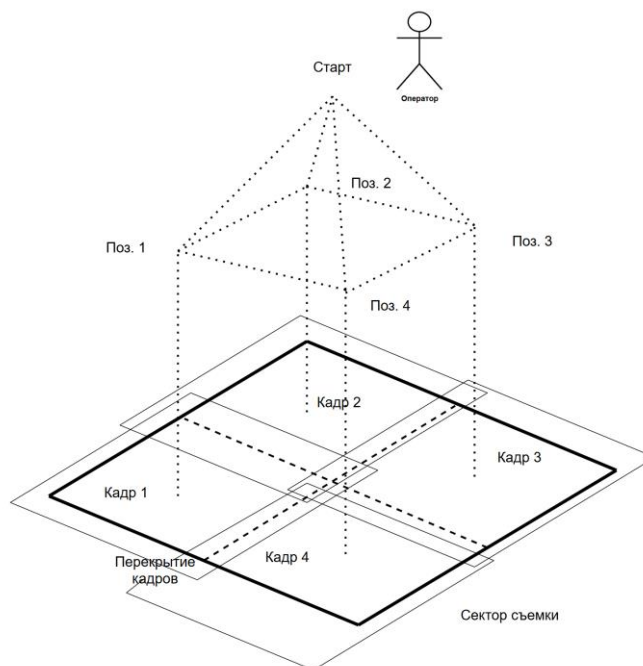


Рисунок 4.1 – Схема формирования кадров для эксперимента

Программная модель содержит модуль управления экспериментом, модуль моделирования группы мобильных объектов, модуль обработки изображений, модуль оценки временных и энергетических затрат и модуль анализа результатов. Модуль управления загружает конфигурацию сценария, формирует состав моделируемой группы, задаёт параметры сцены и запускает последовательность вычислительных этапов.

Модуль группы мобильных объектов хранит описание каждого участника: идентификатор, текущую роль, пространственное положение, характеристики камеры, вычислительную производительность, доступный объём памяти, параметры связи, остаточный энергетический ресурс и перечень назначенных фрагментов. Модуль обработки изображений реализует вычислительное ядро метода – формирование опорного шаблона, получение или загрузку фрагментов, предварительную обработку, выделение ключевых точек, оценку гомографии, контурное уточнение и построение результирующего изображения.

Ресурсная модель оценивает время и энергозатраты, связанные с перемещением мобильных объектов, получением изображений, локальной обработкой и передачей данных. Эти оценки используются при назначении заданий и анализе результатов эксперимента. Модуль анализа рассчитывает SSIM, PSNR, RMSE

reprojection error и Seam Discontinuity Score, описанные в п. 4.1.2, а также сохраняет промежуточные и итоговые данные.

Такая структура программной модели воспроизводит основные этапы метода и методики и позволяет фиксировать параметры процесса на различных стадиях вычислительного цикла.

Использование данной модели обеспечивает проведение серии экспериментов с различными наборами исходных данных и параметрами сценариев. При этом параметры эксперимента могут задаваться предварительно либо формироваться динамически в процессе функционирования модели.

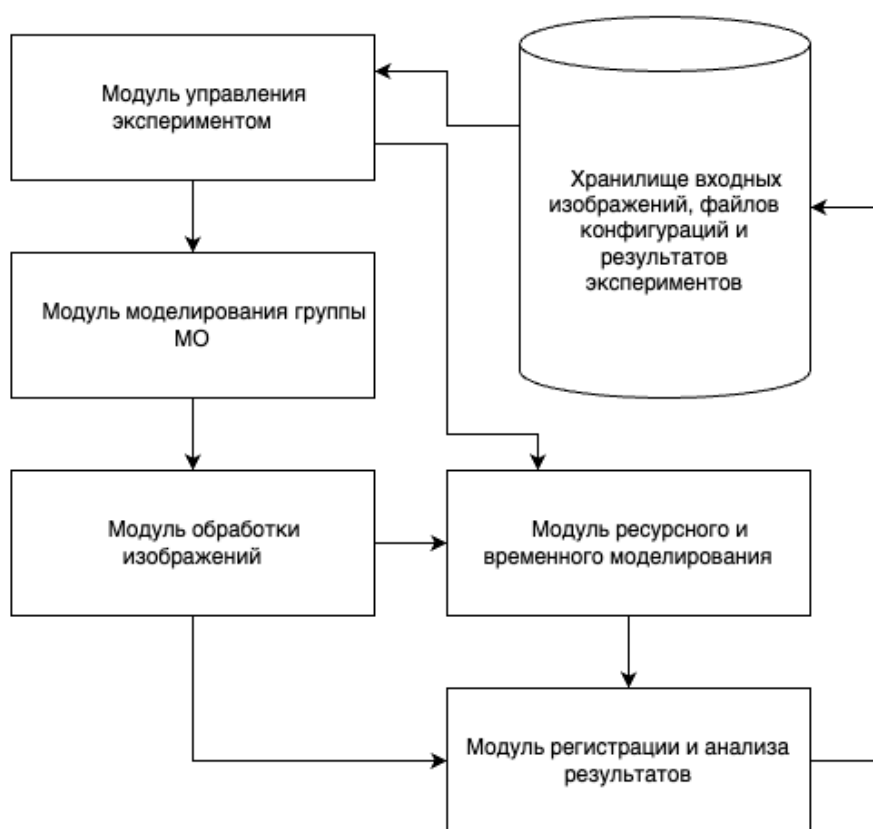


Рисунок 4.2 – Структура программной модели для проведения экспериментального исследования

Для проведения экспериментальных исследований разработана программная модель, воспроизводящая вычислительные и организационные процессы формирования изображения высокого разрешения одним мобильным объектом и группой мобильных объектов. Модель предназначена для проверки вычислительного ядра разработанного метода, исследования распределённой организации обработки,

оценки временных и энергетических затрат, а также анализа устойчивости результата при различных видах искажения исходных данных.

Операции обработки изображений - выделение ключевых точек, оценка геометрических преобразований, контурное уточнение, сшивка и расчёт показателей качества - выполняются непосредственно программными модулями. Процессы перемещения мобильных объектов, распределения заданий, синхронизации, обмена данными и изменения ресурсного состояния воспроизводятся имитационно на основе параметров, задаваемых сценарием эксперимента.

Для оценки эффективности полученных результатов применяются различные метрики, используемые в задачах прикладной фотограмметрии. Их описание и значения для эксперимента приведено ниже в п. 4.1.2.

Используемые метрики характеризуют не только визуальное и структурное качество сформированного изображения, но и косвенно отражают сохранение информационной ценности фрагментов, связанной с достижением требуемого эффективного числа «честных пикселей».

Экспериментальная проверка организована на трёх взаимосвязанных уровнях. На первом исследуются работоспособность и устойчивость метода формирования изображения высокого разрешения, разработанного в главе 2. Основное внимание уделяется совмещению по ключевым точкам, контурному уточнению и итоговой сшивке фрагментов. На втором уровне оценивается методика распределённой обработки информации в группе мобильных объектов, представленная в главе 3. Исследуется эффективность распараллеливания операций получения и предварительной обработки фрагментов, а также влияние количества участников группы на временные и энергетические характеристики процесса формирования изображения.

На третьем уровне оценивается алгоритм функционирования отдельного мобильного объекта и группы мобильных объектов как механизм организации выполнения вычислительно-съёмочного цикла, включая распределение ролей, назначение заданий, синхронизацию действий участников и интеграцию промежуточных результатов.

Качество данных также является различным – исходные изображения могут содержать шумы различной природы, искажения, характерные для камер различного качества, а также артефактов, присущих различным погодным и природным условиям (туман, плохая освещенность, задымление).

Атмосферные и оптические эффекты в рамках эксперимента рассматриваются как один из источников деградации входных данных, влияющий одновременно на контраст, выделяемость контуров и устойчивость сопоставления признаков. Поэтому такие эффекты моделируются отдельно от геометрических искажений и шумов, что позволяет оценить устойчивость предложенного метода к различным типам ухудшения исходных изображений.

Поэтому, при проведении экспериментов было принято решение о рассмотрении следующих вариантов ухудшения качества изображений:

1. Использование вариантов шумовой компоненты с регулируемой мощностью.
2. Использование программных моделей искажений снимков с камер мобильных объектов.
3. Использование программных моделей размытия снимков с камер мобильных объектов, что эмулирует визуальное снижение резкости вследствие различных факторов: неправильной фокусировки, движения камеры, оптических аберраций или совокупного действия атмосферы (с установкой основных параметров сигма и размера ядра).

При этом также следует учитывать, что искажения и зашумления следует применять и к камере МО, которое формирует шаблон низкого разрешения, и к камерам MO_i . Кроме того, некоторые эффекты взаимодействуют друг с другом и оказывают взаимный эффект. Для чистоты, основную часть экспериментов будем проводить только с одним эффектом по очереди.

1. Этап ввода начальных данных (снимок лидирующего объекта, серия снимков – фрагментов с MO_i).

2. Этап применения конфигурации и сценария эксперимента (определение цели, основных изменяемых параметров, последовательности шагов эксперимента).

3. Этап предварительной обработки данных (например, применение зашумлений и искажений к снимкам).

4. Этап применения шагов эксперимента по основному алгоритму (в соответствии с предложенным методом и методикой по заданному сценарию).

5. Сохранение результатов эксперимента.

Для каждого из приведенных этапов целесообразно выделить в соответствии с выбранными направлениями исследования совокупность оцениваемых параметров, а также определить степени влияния и обобщенную структуру связей между ними.

В соответствии с этим, можно выделить следующую методику проведения экспериментальных исследований:

1. Создание базы модельных и реальных изображений различной природы возникновения. Размещение изображений в локальном пространстве программной модели. Разметка данных и создание метаданных.

2. Формирование конфигураций программных моделей с применением методов разметки данных и специальных форматов типа JSON/YAML. Создание системы управления конфигурациями на основе переменных среды выполнения.

3. Расстановка целей экспериментов, ключевых оцениваемых параметров, их взаимных зависимостей, а также формирование сценариев проведения экспериментов с применением конфигураций и автоматизированной системы запуска.

4. Формирование пакета данных (настройки, сценарий, исходные изображения) для проведения очередного эксперимента согласно сценарию.

5. Ввод данных в программную модель и запуск эксперимента, проведение экспериментальных исследований по этапам 1–5.

6. Логирование и фиксация результатов экспериментов, визуализация и наблюдение с применением специального программного обеспечения.

7. Комплексный анализ полученных данных экспериментальных исследований.

8. Окончание исследования или переход к следующей итерации.

Проведение эффективного экспериментального исследования предложенного решения целесообразно проводить в составе моделирующего программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего работу или имитацию оконечного и периферийного оборудования и программ с генерацией и последующей обработкой модельных и реальных данных. Это означает, что для получения фотографических снимков должно применяться устройство с камерой, близкой по характеристикам к реальным мобильным объектам, а вычислительная мощность ЭВМ должна быть близка к средним характеристикам реального мобильного объекта.

4.1.2 Основные показатели качества изображений для проведения экспериментов

Для оценки качества работы предложенного алгоритма было предложено использовать следующие метрики качества изображений:

1. SSIM (Structural Similarity Index) - оценивает структурное сходство проверяемого изображения с эталоном. При расчете сравниваются яркость, контраст и локальная структура деталей. Значение обычно находится в диапазоне от 0 до 1 при этом 1 означает полное структурное совпадение, чем значение ближе к 1, тем лучше сохранены формы, границы и детали объектов, а низкое значение указывает на размытие, геометрическое смещение, потерю деталей или заметные отличия яркости и контраста. Показатель SSIM выбран, так как чувствителен к несовпадению геометрии [176–178].

2. PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) - оценивает среднюю пиксельную близость изображения к эталону. Метрика основана на среднеквадратичной ошибке между значениями пикселей. PSNR измеряется в децибелах - чем выше

PSNR, тем меньше средняя пиксельная ошибка, низкий PSNR означает сильные отличия цвета, яркости, шума или геометрии, а бесконечное значение «inf» возникает при сравнении двух полностью одинаковых изображений [177,178].

3. RMSE reprojection error оценивает геометрическую точность совмещения изображений. Для соответствующих контрольных или ключевых точек определяется расстояние между ожидаемым и фактическим положением после применения преобразования. Метрика измеряется в пикселях и, при этом, 0 означает идеальное совпадение контрольных точек, чем меньше RMSE, тем точнее геометрическое совмещение, тогда как большое значение указывает на сдвиг, поворот, ошибку масштаба, перспективное искажение или неверные соответствия точек. Для фотogramметрии эта метрика имеет высокий приоритет [178,179].

4. Seam Discontinuity Score оценивает заметность границ между сшитыми сегментами. Метрика измеряет скачки яркости, цвета и градиента по линии шва. В текущем эксперименте используется нормированное безразмерное значение, где 0 означает отсутствие заметного перехода, чем меньше значение, тем более плавным является шов, а большое значение указывает на разницу экспозиции, цвета, резкости, геометрическое несовпадение или недостаточное смешивание сегментов [180].

Значение показателей приведено в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Значения показателей качества

Метрика	Плохое	Среднее	Хорошее	Превосходное
SSIM	< 0.6	0.60–0.75	0.75–0.9	> 0.9
PSNR	< 20	20–30	30–40	> 40
RMSE репроекции	> 3	1.5–3	0.5–1.5	< 0.5
Seam Discontinuity Score	>0.065	0.035–0.065	0.015–0.035	<0.015

4.2 Экспериментальная проверка разработанного метода и алгоритма

Проверка работоспособности была выполнена при помощи разработанного программного обеспечения на языке Python и выполнялась в соответствии с методикой проведения эксперимента, предложенной в п 4.1, дополненная следующими действиями,

1. Создается фотография сцены с максимально возможным качеством при помощи устройства, близкого к эталонному.
2. Выбирается устройство со значительно большим K_{HW} , которое может применяться в реальных задачах фотограмметрии для снижения аппаратных требований.
3. Делается опорная фотография той же сцены со второго устройства.
4. Считаются основные и дополнительные характеристики изображения относительно эталонного для опорной фотографии.
5. Потом выполняются снимки сцены, согласно декомпозиции, минимум на матрице 2 на 2, затем 3 на 3 для отслеживания тенденции к улучшению качества при увеличении количества устройств в соответствии с предложенной методикой и алгоритмом.
6. Затем отрабатывает разработанный алгоритм и формируется изображение высокого разрешения.
7. Считаются основные и дополнительные характеристики изображения относительно эталонного для сформированного составного изображения.

Результат эксперимента показан на Рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Результат проведения эксперимента

В рамках эксперимента получены следующие результаты, позволяющие сделать вывод о целесообразности применения в целевой области фотограмметрии (Таблица 4.2).

В целом можно сделать вывод о том, что в сравнении с обычным кадром координирующего устройства получено:

1. По SSIM наблюдается улучшение с 0.79 до 0.97.
2. По PSNR наблюдается улучшение с 24.1 дБ до 33.86 дБ.
3. Показатель RMSE остается в пределе <0.5 , что является наилучшим результатом.

4. Показатель Seam Discontinuity Score (Ошибка шва) остается в пределе <0.15 , что является наилучшим результатом.

Результаты эксперимента с вербальной интерпретацией представлены к таблице (см. Таблица 4.3).

Таблица 4.2 – Метрики результатов эксперимента

Результат	Сетка	Метод	SSIM	PSNR, дБ	RMSE	Ошибка шва
Лидер/ координатор	База	Камера лидера	0.79	24.1	-	-
Сшивка по ключевым точкам	2x2	SIFT	0.91	30.12	0.52	0.024
Сшивка по ключевым точкам и уточнение по контурам	2x2	SIFT + контур- ный анализ	0.95	32.14	0.45	0.0101
Сшивка по ключевым точкам	3x3	SIFT	0.92	30.86	0.51	0.02
Сшивка по ключевым точкам и уточнение по контурам	3x3	SIFT + контур- ный анализ	0.97	33.86	0.4959	0.0098

Таблица 4.3 – Вербальная интерпретация результатов экспериментов

Результат	SSIM	PSNR	RMSE	Швы
Изображение координатора	Хорошее	Среднее	Неприменимо	Неприменимо
Контурно-фотометрическое уточнение 2x2	Превосходное	Хорошее	Превосходное	Превосходное
Контурно-фотометрическое уточнение 3x3	Превосходное	Хорошее	Превосходное	Превосходное

Из полученных данных эксперимента можно сделать вывод, что сшивка с контурным совмещением с увеличением числа сегментов (снимков ведомыми мобильными устройствами) дает лучший баланс в плане формирования изображений

высокого разрешения. Разработанный метод достигает хорошего качества по метрикам SSIM, корреляции гистограмм и ошибке среднего градиента, а также сохраняет хорошее качество по доле черных пикселей и доле резких переходов. По параметру PSNR и оценке артефактов качество остается средним, но в целом подтверждает экспериментально улучшение качества даже для мобильного устройства с плохой камерой и низкими характеристиками камеры.

Также стоит отметить, что в таблицу внесены данные, которые подтверждают эффективность предложенного решения, а именно использование шаблона, алгоритма SIFT и контурного совмещения в сравнении с вариантом использования шаблона и алгоритма SIFT. Вариант использования только алгоритмов детектирования ключевых точек SIFT, ORB, SURF и т. д. без использования шаблона не представлен в таблице в силу зафиксированных низких значений метрик. Использование контурного совмещения совместно с шаблоном и алгоритмом детектирования ключевых точек дает значительное превосходство по сравнению с вариантом без использования контурного совмещения по всем ключевым метрикам.

Далее приведены результаты экспериментов, показывающих устойчивость разработанного метода и алгоритмов к воздействию шумов и искажений различной природы.

4.3 Анализ устойчивости метода к влиянию внешних воздействий различной физической природы

4.3.1 Влияние шумов различной природы на работу метода

Данный эксперимент строится вокруг процесса наложения шума на исходное изображение, что имитирует ситуацию, когда фотография с камеры мобильного объекта уже получается неидеальной, присутствует плохое освещение, происходит

искажение из-за сжатия, помех или аппаратных ограничений. При этом гауссов шум более характерен для имитации электронных шумов матрицы камеры, а соляной и перцовый шум - дефекты на изображениях от цифровых ошибок.

В экспериментах устанавливаются два изменяющихся параметра: mean и std. Mean означает среднее смещение, которое вносит шум к значениям пикселей. Если это значение равно 0 - шум не будет изменять общую яркость изображения, а только добавлял «помехи». Если значение не нулевое - изображение будет систематически осветляться или затемняться. Std задает стандартное отклонение и показывает, насколько сильно шум отклоняется от среднего значения. Чем больше значение std, тем сильнее амплитуда шумов и тем более «грязным» будет изображение.

На Рисунке 4.4 показан прогресс применения процесса зашумления к исходному изображению в виде трех «срезов»: первая итерация с малым шумом, «средняя» итерация и «конечная» итерация с максимальным зашумлением.

Влияние шумов на исходное изображение

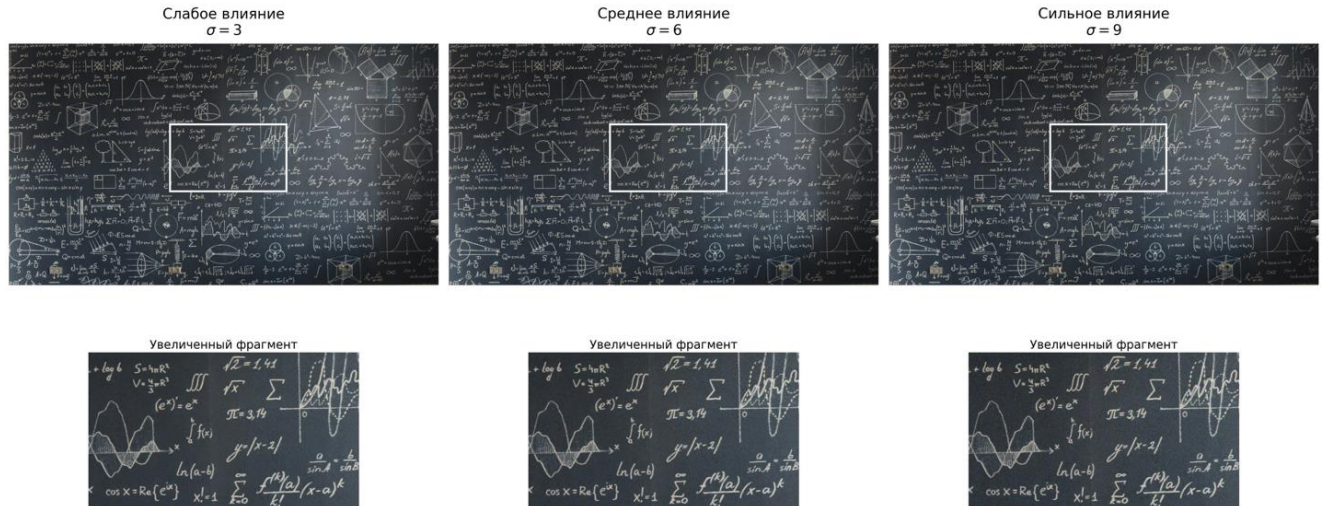


Рисунок 4.4 – Динамика зашумления исходного изображения

Основные параметры качества полученных результатов показаны на Рисунке 4.5., а данные по эффективности применения разработанного метода – в Таблице 4.4.

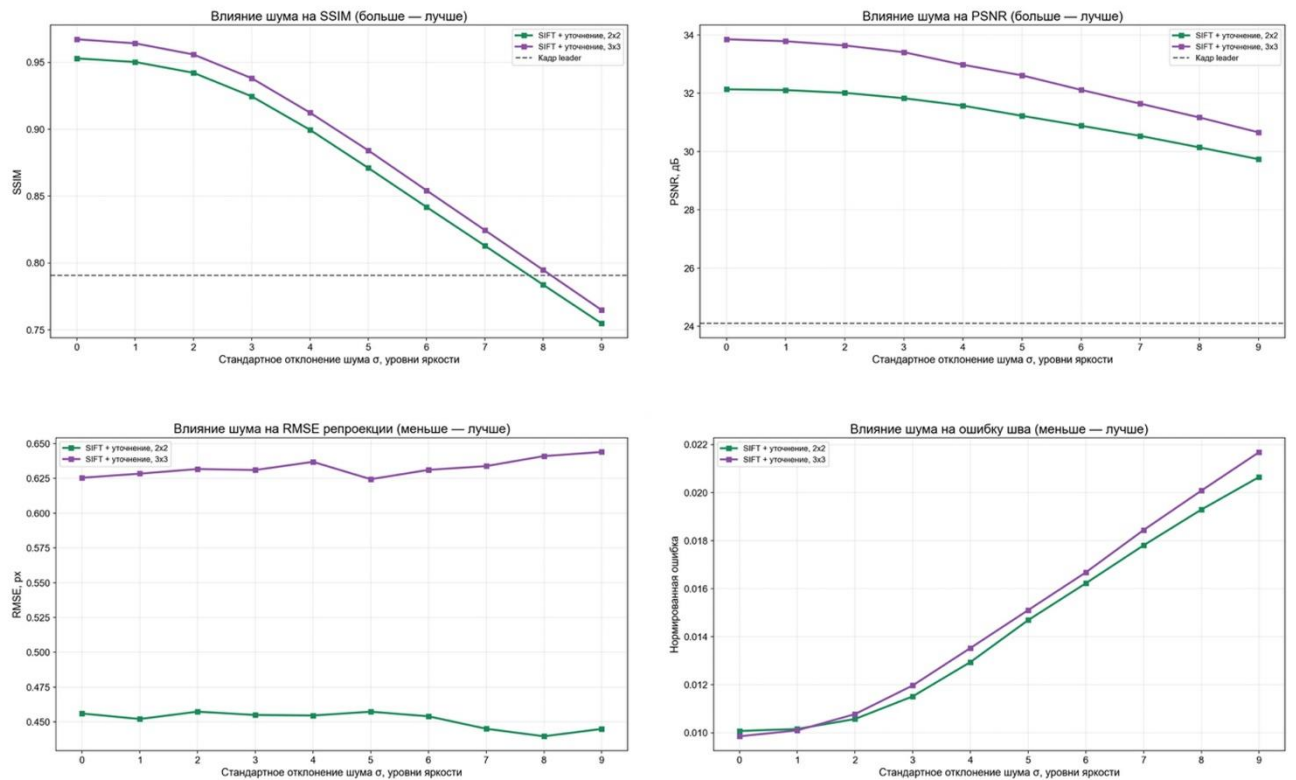


Рисунок 4.5 – Динамика изменения параметров качества

Интерпретация результатов исследования устойчивости разработанного алгоритма к воздействию шумов является следующей.

1. SSIM и PSNR монотонно снижаются: шум постепенно уменьшает структурную и пиксельную близость к эталону.
2. Ошибка шва монотонно растет, однако не превышает критических значений.

Значение RMSE остаётся на субпиксельном уровне. Небольшие немонотонные изменения показателя связаны с особенностями устойчивого поиска соответствий SIFT/RANSAC и не указывают на появление систематической ошибки геометрической регистрации.

Эксперимент показал, что контурное уточнение повышает значения SSIM и PSNR при всех исследованных уровнях шума. RMSE сохраняется в субпиксельном диапазоне; рост ошибки в области шва при максимальном зашумлении не приводит к потере работоспособности и остаётся в пределах, принятых для данного эксперимента.

Таблица 4.4 – Эффективность применения разработанного метода при наличии шумов.

Уровень шума	Сетка	Метод	SSIM	PSNR	RMSE	Ошибка шва
Низкий	2x2	SIFT	0.896	30.42	0.56	0.0263
Низкий	2x2	SIFT + контурный анализ	0.95	32.11	0.45	0.0102
Низкий	3x3	SIFT	0.92	30.94	0.6	0.0261
Низкий	3x3	SIFT + контурный анализ	0.96	33.79	0.4984	0.0101
Средний	2x2	SIFT	0.81	29.13	0.62	0.0357
Средний	2x2	SIFT + контурный анализ	0.87	31.23	0.48	0.0147
Средний	3x3	SIFT	0.86	30.42	0.65	0.036
Средний	3x3	SIFT + контурный анализ	0.88	32.61	0.498	0.015
Высокий	2x2	SIFT	0.69	27.14	0.71	0.046
Высокий	2x2	SIFT + контурный анализ	0.75	29.74	0.54	0.021
Высокий	3x3	SIFT	0.7	28.24	0.76	0.046
Высокий	3x3	SIFT + контурный анализ	0.76	30.66	0.63	0.022

Формирование итогового изображения из нескольких частично перекрывающихся наблюдений повышает устойчивость к случайному шуму. Однако увеличение эффективного числа «честных пикселей» возможно лишь в тех областях, где зашумление не разрушает признаки, необходимые для регистрации и контурного уточнения. В исследованном диапазоне параметров метод сохраняет работоспособность и по характеристикам результирующего изображения превосходит базовый вариант на основе SIFT, что подтверждает устойчивость к рассматриваемому классу воздействий.

4.3.2 Влияние размытия и атмосферных эффектов различной природы на работу метода

В этом эксперименте на исходное изображение накладывается размытие, в частности гауссово. Такой тип деградации широко применяется при экспериментальном исследовании алгоритмов обработки изображений, поскольку воспроизводит снижение локального контраста и потерю высокочастотной информации, характерные для ряда реальных условий съёмки.

Математически гауссово размытие представляет собой свёртку изображения с двумерным ядром, сглаживающим резкие перепады интенсивности. В рамках эксперимента оно используется как приближённая модель следующих эффектов:

- дефокусировки;
- смаза вследствие движения камеры (motion blur);
- атмосферных искажений, включая тепловые неоднородности и пылевые помехи;
- ограничений оптического тракта камеры.

Размытие в экспериментах имеет два основных параметра: `kernel_size` и `sigma`. Также используются настраиваемые параметры `motion` и `defocus`.

Значения этих параметров следующие:

- `kernel_size` – это размер ядра свёртки. Он показывает размер матрицы фильтра (например, 3×3 , 5×5 , 11×11), с которой производится свёртка изображения. Чем больше `kernel_size`, тем сильнее размытие, так как большое ядро размывает более широкие области и уничтожает мелкие детали. В контексте эксперимента этот параметр влияет на конечную резкость контуров, видимость мелких деталей, работу алгоритмов с краями.
- `sigma` – это стандартное отклонение в Гауссовом размытии. Характеризует «размах» гауссовой функции - как быстро падает вес с удалением от центра. Влияет на размытие высокочастотной информации, точность обнаружения границ и контуров, работу фильтров и распознавание объектов.

- motion – это размытие движения. Подпараметры этого показателя определяют сколько пикселей распространяется эффект движения и угол, под которым происходит «движение». По своей сути, параметр определяет направление смаза (по горизонтали, вертикали, диагонали).
- defocus – это имитация оптической расфокусировки, как если бы камера была не настроена на нужное расстояние. Технически реализуется с помощью свёртки с круглым (дисковым) ядром. С точки зрения проводимого эксперимента, симулирует реальное размытие камеры.

Рассмотрим ниже полученные результаты экспериментов и проведем интерпретацию результатов.

Для данного эксперимента, как и предыдущего, используются динамические шкалы размытия. На Рисунке 4.6 показан прогресс применения процесса размытия к исходному изображению в виде трех «срезов»: первая итерация с малым размытием, «средняя» итерация и «конечная» итерация с максимальным размытием.

Влияние размытия на исходное изображение

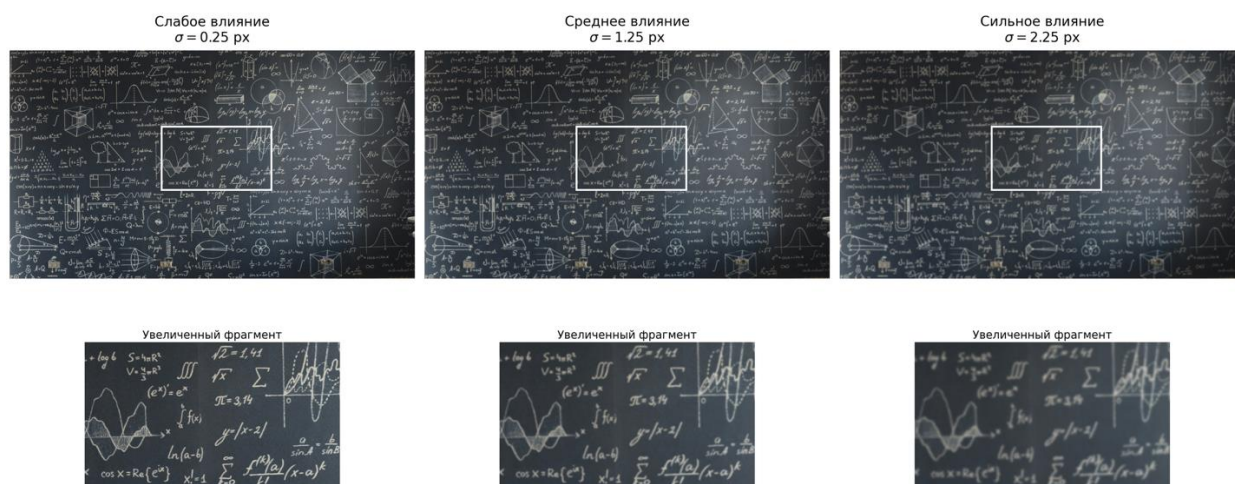


Рисунок 4.6 – Динамика размытия исходного изображения

Основные параметры качества полученных результатов показаны на Рисунке 4.7., а данные по эффективности применения разработанного метода – в Таблице 4.5.

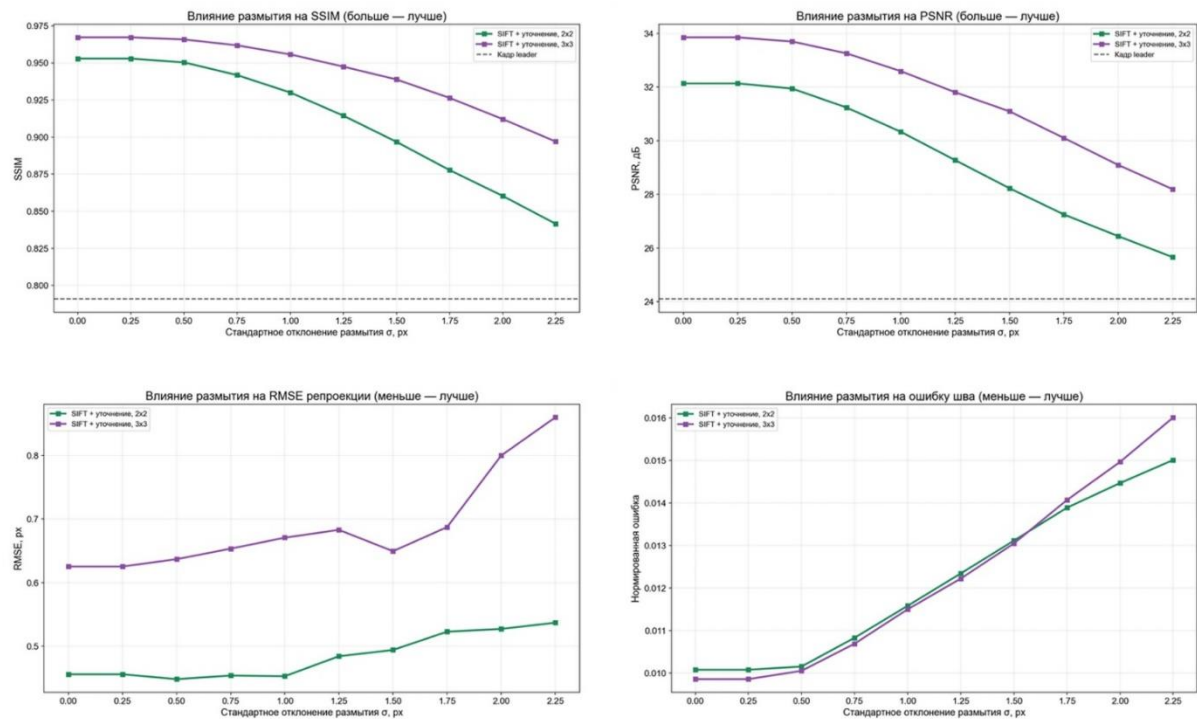


Рисунок 4.7 – Динамика изменения параметров качества

Полученные результаты эксперимента по оценке устойчивости разработанного метода к воздействию размытия могут быть интерпретированы следующим образом.

1. Снижение значений SSIM и PSNR связано с потерей высокочастотных компонентов изображения, уменьшением детализации мелких структур и снижением контрастности границ объектов. При этом значения указанных метрик сохраняются в пределах, соответствующих условиям работоспособности метода.
2. При увеличении степени размытия наблюдается снижение структурного сходства и отношения сигнал/шум, а также монотонное увеличение ошибки в области сшивки, что связано с ухудшением качества исходной информации, используемой при регистрации фрагментов.
3. RMSE увеличивается с ростом степени размытия: при ядре 2×2 показатель изменяется от 0,46 до 0,54 px , а при ядре 3×3 – от 0,63 до 0,86 px . Несмотря на рост, ошибка остаётся в установленном допустимом диапазоне, поэтому геометрическая регистрация сохраняет устойчивость.
4. Вариант с ядром размытия 3×3 в отдельных случаях лучше сохраняет SSIM и PSNR, однако одновременно характеризуется большей RMSE и ошибкой в

области сшивки. Это указывает на компромисс между сохранением общей структуры изображения и точностью локального геометрического согласования. По мере усиления размытия качество результата снижается вследствие потери высокочастотной информации, уменьшения контрастности границ и ухудшения выделения устойчивых признаков. Контурное уточнение уменьшает локальные артефакты сшивки и улучшает структурную согласованность, но не восстанавливает мелкие детали, утраченные в исходных фрагментах.

Таблица 4.5 – Эффективность применения разработанного метода при наличии размытия.

Уровень размытия	Сетка	Метод	SSIM	PSNR	RMSE	Ошибка шва
Низкий	2x2	SIFT	0.8997	30.95	0.56	0.018
Низкий	2x2	SIFT + контурный анализ	0.95	32.14	0.46	0.01
Низкий	3x3	SIFT	0.91	31.35	0.75	0.016
Низкий	3x3	SIFT + контурный анализ	0.967	33.85	0.63	0.0099
Средний	2x2	SIFT	0.84	27.22	0.85	0.02
Средний	2x2	SIFT + контурный анализ	0.91	29.28	0.48	0.012
Средний	3x3	SIFT	0.85	29.97	0.99	0.018
Средний	3x3	SIFT + контурный анализ	0.95	31.81	0.68	0.012
Высокий	2x2	SIFT	0.67	23.46	1.12	0.039
Высокий	2x2	SIFT + контурный анализ	0.84	25.66	0.54	0.015
Высокий	3x3	SIFT	0.68	24.12	1.36	0.04
Высокий	3x3	SIFT + контурный анализ	0.9	28.2	0.86	0.016

Эксперимент подтверждает устойчивость метода к умеренному размытию и его способность уменьшать геометрические дефекты в зонах объединения. При

значительной деградации исходных данных метод не предназначен для полного восстановления первоначального качества изображения.

4.3.3 Влияние искажений на работу метода

Следующий эксперимент посвящён геометрическим искажениям, в частности перспективным. Perspective distortion (перспективное искажение) возникает при отклонении направления съёмки от нормали к объекту и приводит к неодинаковому масштабу различных участков изображения. Наиболее характерные условия его появления:

- съёмка объекта под углом, а не фронтально;
- расположение объекта вблизи края кадра;
- использование широкоугольного объектива.

Характерные признаки перспективных искажений:

- параллельные линии в реальности выглядят сходящимися;
- прямоугольники превращаются в трапеции;
- пропорции объекта искажаются в зависимости от расстояния до камеры.

Перспективные искажения имитируют фотосъёмку под некоторым углом, реальные условия мобильной съёмки, где идеального фронтального ракурса нет, а также искажения при проецировании или склейке изображений (панорамная съёмка или виртуальная реальность).

Рассмотрим ниже полученные результаты экспериментов и проведем интерпретацию результатов.

Для данного эксперимента, как и предыдущих, используются динамические шкалы искажения. На Рисунке 4.8 ниже показан прогресс применения процесса ис-

кажений размытия к исходному изображению в виде трех «срезов»: первая итерация с малым искажением, «средняя» итерация и «конечная» итерация с максимальным искажением.

Влияние дисторсии на исходное изображение

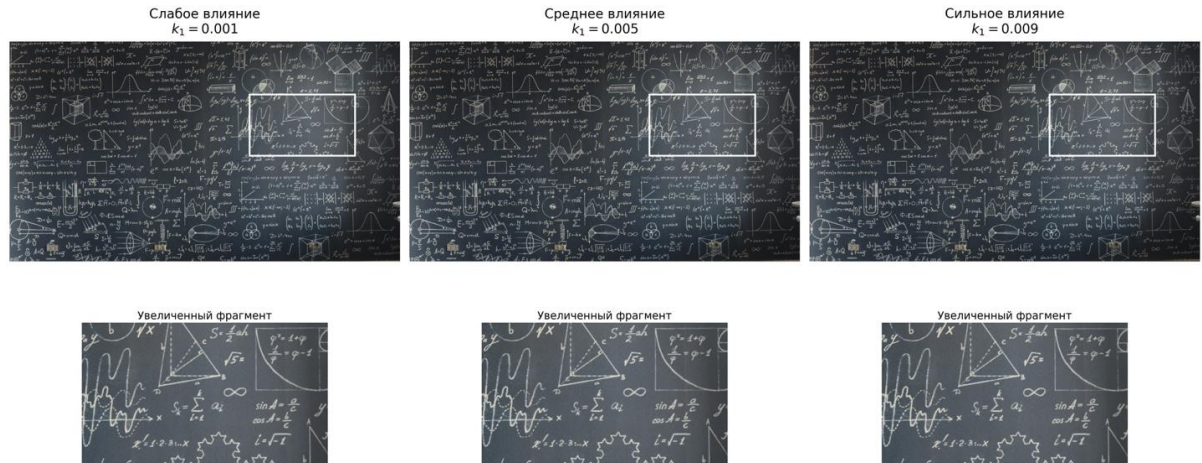


Рисунок 4.8 – Динамика искажений для исходного изображения

Основные параметры качества полученных результатов показаны на Рисунке 4.9., а данные по эффективности применения разработанного метода – в Таблице 4.6.

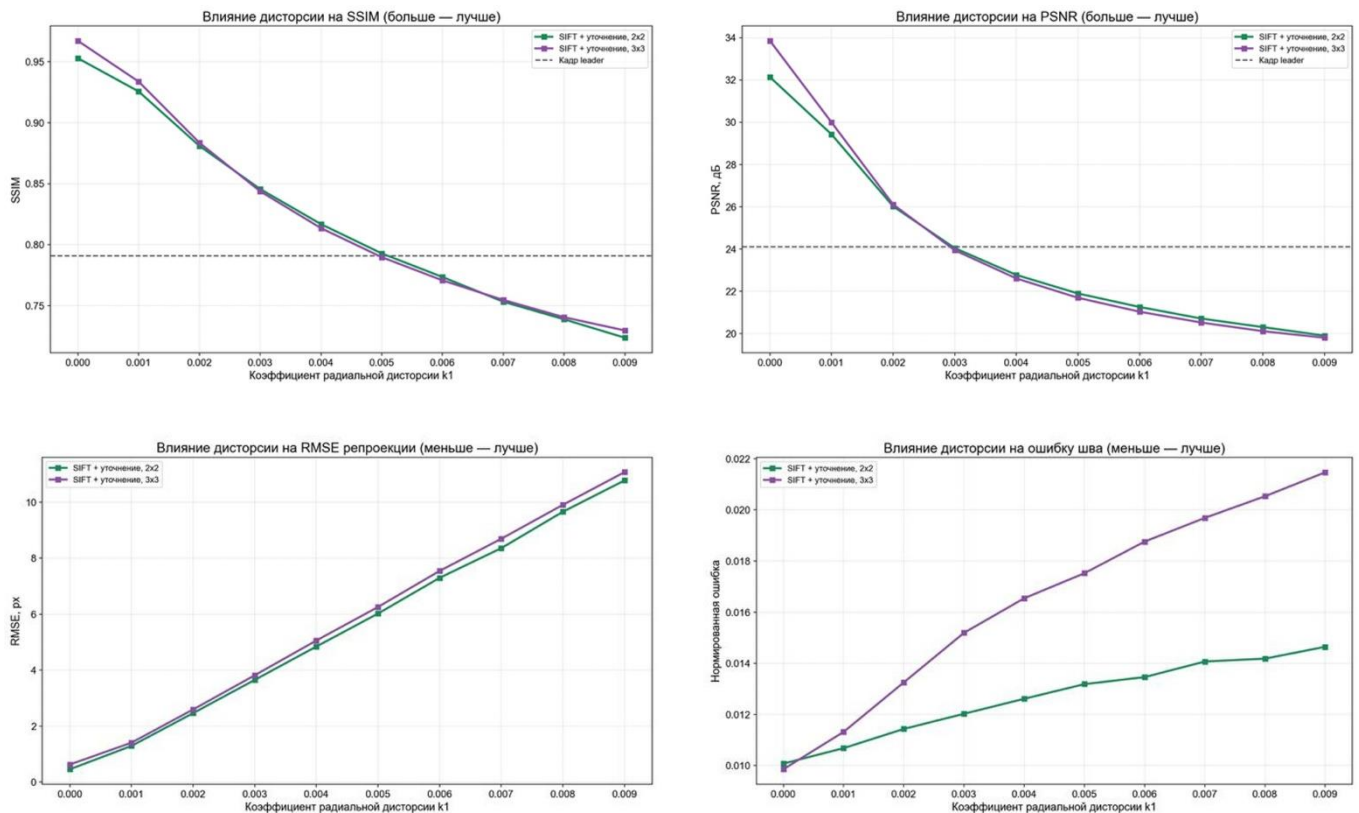


Рисунок 4.9 – Динамика изменения параметров качества

Таблица 4.6 – Эффективность применения разработанного метода при наличии искажений.

Уровень размытия	Сетка	Метод	SSIM	PSNR	RMSE	Ошибка шва
Низкий	2x2	SIFT	0.9	28.12	2.48	0.0154
Низкий	2x2	SIFT + контурный анализ	0.927	29.42	1.29	0.01
Низкий	3x3	SIFT	0.91	28.52	2.63	0.016
Низкий	3x3	SIFT + контурный анализ	0.934	29.99	1.41	0.011
Средний	2x2	SIFT	0.73	19.77	11.24	0.019
Средний	2x2	SIFT + контурный анализ	0.79	21.89	6.02	0.013
Средний	3x3	SIFT	0.73	19.85	11.76	0.024
Средний	3x3	SIFT + контурный анализ	0.7897	21.68	6.25	0.018
Высокий	2x2	SIFT	0.65	17.76	15.87	0.027
Высокий	2x2	SIFT + контурный анализ	0.72	20.19	10.78	0.015
Высокий	3x3	SIFT	0.6493	17.98	16.09	0.03
Высокий	3x3	SIFT + контурный анализ	0.73	20.79	11.07	0.022

В результате проведения эксперимента метод не отказал, но дисторсия влияет на него существенно сильнее шума и размытия. Для фотограмметрии необходима предварительная калибровка объектива и коррекция радиальной дисторсии, что логично в данной сфере науки и практике:

1. Снижение SSIM и PSNR характеризует геометрическое отличие панорамы от неискаженного эталона.

2. Рост RMSE показывает, насколько хуже одна гомография описывает нелинейно искаженный кадр, а рост ошибки шва означает усиление геометрических расхождений между соседними сегментами.

3. Все сшивки эксперимента завершились без отказа SIFT, однако геометрическая точность ухудшается достаточно быстро, начиная с низкого уровня искажений.

4. Сетка 3x3 немного лучше сохраняет SSIM при высокой дисторсии, но 2x2 имеет меньшую ошибку шва и немного меньший RMSE.

5. В данном случае метрика Seam Discontinuity Score (ошибка шва) находится в высоких пределах, несмотря на стремительное ухудшение метрики RMSE.

Таким образом, эксперимент по влиянию внешних воздействий показывал, что предложенная двухэтапная схема совмещения повышает устойчивость формирования результирующего изображения по сравнению с базовым вариантом без контурного уточнения.

Далее проведена оценка временных затрат при параллельном запуске алгоритма обработки информации на мобильных объектах группы.

4.4 Оценка временных затрат при реализации методики и алгоритма обработки информации в задаче формирования изображений высокого разрешения

В разделе рассматривается распараллеливание операций обработки в соответствии с методикой, разработанной в главе 3.

Временные затраты оценивались в двух режимах. В первом измерялось фактическое время параллельной обработки фрагментов на одном вычислительном узле с несколькими программными рабочими потоками. Этот режим показывает эффект распараллеливания вычислительного ядра метода, но не воспроизводит полностью физическую работу распределённой группы мобильных объектов.

Во втором режиме выполнялось имитационное масштабирование процесса на заданное число мобильных объектов. Для каждого участника рассчитывалось время назначенных операций, а продолжительность общего вычислительно-съёмочного цикла определялась по критическому пути – как максимальное время выполнения заданий отдельными исполнителями с добавлением затрат на синхронизацию, передачу данных и интеграцию промежуточных результатов.

Значения для количества мобильных объектов, превышающего фактически реализованное число программных потоков, являются результатами имитационного моделирования и не рассматриваются как прямые измерения производительности физической группы соответствующего размера.

Следует отметить, что оценки для больших значений числа мобильных объектов (более 9–12) в настоящем разделе используются преимущественно для анализа масштабирования программной модели и оценки характера изменения накладных расходов при увеличении числа участников группы. С практической точки зрения, в рамках разработанной методики, ориентированной на мобильные группы ограниченного состава, основное внимание уделяется диапазону 3–9 устройств, в котором обеспечивается рациональное соотношение между сокращением времени выполнения, устойчивостью организации процесса и затратами на координацию участников.

Результаты анализа вычислительного процесса при распараллеливании обработки информации в группе мобильных объектов представлены на Рисунке 4.10 ниже.

Полученные оценки показывают, что рост числа устройств сопровождается ожидаемым увеличением ускорения, однако после диапазона 6–8 мобильных объектов выигрыш начинает уменьшаться из-за роста накладных расходов на синхронизацию и интеграцию результатов. Поэтому значения, полученные для 12–20 устройств, следует интерпретировать как верхнюю оценку масштабируемости программной модели, а не как рекомендуемую практическую конфигурацию системы.

При расчетах использовались усредненные значения по 100 запускам.

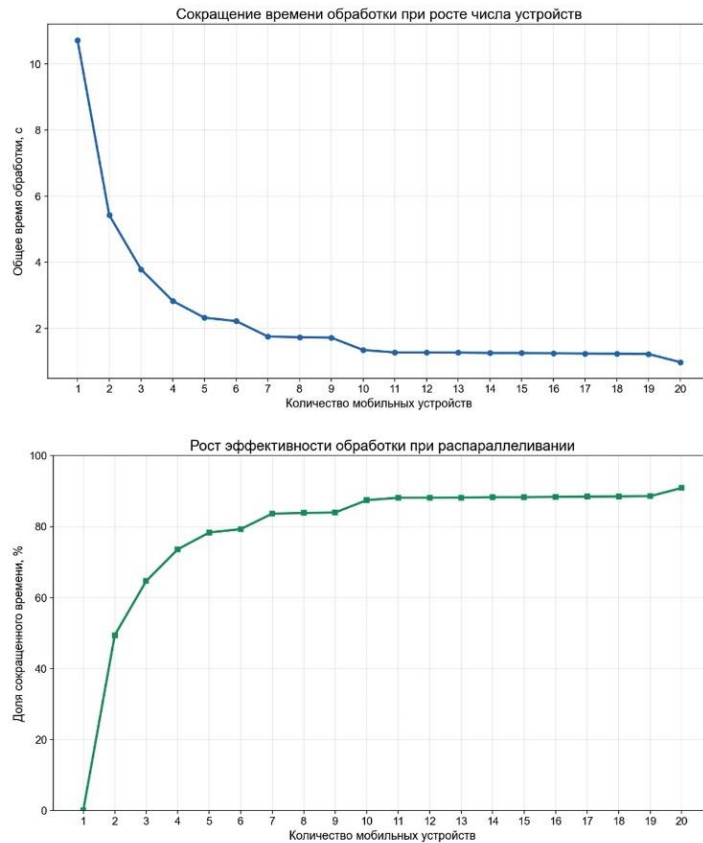


Рисунок 4.10 – Анализ времени выполнения при распараллеливании на группе мобильных устройств и рост эффективности

Относительный эффект в части уменьшения времени формирования изображения монотонно уменьшается с увеличением количества мобильных объектов. Это объясняется ростом накладных расходов на распределение и агрегацию данных. Оптимальный баланс между ускорением и эффективностью достигается при 6–9 мобильных объектах.

Эксперимент подтверждает, что параллельная обработка подкадров существенно сокращает общее время решения задачи. Результаты представлены в Таблице 4.7.

Эффективность параллельного решения рассчитывается как отношение достигнутого ускорения к числу участвующих мобильных объектов:

$$p_{eff} = \frac{S_m}{m} \cdot 100\%. \quad (4.1)$$

где S_m – ускорение, такое что $S_m = T_1/T_m$, T_1 – время выполнения на одном устройстве, а T_m – время выполнения на m устройствах.

Таблица 4.7 Результаты экспериментов по изменению числа мобильных объектов

Мобильных устройств	Время решения	Идеальное ускорение	Реальное ускорение	Эффективность
1	10,719 с	-	-	-
2	5,425 с	2,0×	1,98×	99%
4	2,831 с	4,0×	3,79×	94,75%;
9	1,718 с	9,0×	6,24×	69,3%
16	1,247 с	16,0×	9,10×	56,88%
20	0,976 с	20,0×	10,98×	54,9%;

На графике (см. Рисунок 4.10) показана доля сокращенного времени, которая ожидаемо растет. Классическая эффективность характеризует загрузку каждого устройства и обычно снижается при увеличении их числа.

Таким образом, эксперимент показывает состоятельность предложенной методики с параллельным выполнением процессов обработки данных при формировании изображений высокого разрешения на группе мобильных устройств, но имеет некоторые ограничения на размер эффективной группы.

Эксперимент показывает, что предложенный метод обработки информации для формирования изображений высокого разрешения применим к задачам прикладной фотограмметрии и эффективно масштабируется при распределенной обработке подкадров. При увеличении количества мобильных устройств с 1 до 20 расчетное ускорение обработки возрастает с 1,0× до 10,98×. При этом классическая эффективность распараллеливания относительно идеального ускорения снижается со 100% до 54,9%. Снижение обусловлено накладными расходами на распределение задач, передачу данных и сбор результатов, а также неодинаковой продолжительностью обработки подкадров. Несмотря на это, достигнутое ускорение подтверждает целесообразность групповой обработки фотограмметрических данных мобильными устройствами согласно разработанной методики.

При использовании группы мобильных объектов необходимое число фрагментов, а значит и требуемое число потенциальных «честных пикселей», формируется параллельно, что позволяет снизить требования к производительности и камере отдельного устройства при сохранении качества итогового изображения.

Кроме того, проведенное экспериментальное исследование и реализованные алгоритмы демонстрируют возможность полного или частичного применения всех этапов обработки информации для формирования изображений высокого разрешения в различных сферах. В частности, если представить разработанное решение в виде шагов (Steps, S), следующим образом, то можно сформировать матрицу применимости (см. Таблицу 4.8).

1. S0: захват/синхронизация подкадров;
2. S1 предобработка подкадров (например, удаление шумов / компенсация искажений);
3. S2 выделение опорных точек / расчет дескрипторов;
4. S3 регистрация подкадров / выравнивание подкадров между собой;
5. S4 сшивка подкадров / композиция изображения;
6. S5 постобработка полученных результатов совмещения / удаление артефактов;
7. Sx кооперация мобильных устройств / распределение задач между участниками группы устройств.

Таблица 4.8 – Матрица применимости предложенного решения полностью или частично по этапам

№	Сфера применения	Рекомендуемый охват этапов (в полном объеме, без изменений)	Примечания
1	Панорамирование/ картография (наземная)	S0–S5	При сильном размытии/шуме или когда перекрытия кадров недостаточно - можно отложить S4 и применить локально-блочную S3, зафиксировав параметры наложения.

Продолжение таблицы 4.8

2	Видеонаблюдение/edge-аналитика	S0–S3	S4 выполнять преимущественно оффлайн/на сервере, а при ограниченной связи передавать признаки (Sx), но локально держать результаты S2–S3.
3	Промышленная инспекция/метрология	S0–S5 (офлайн) / S0–S3 (онлайн)	Если требуются высокие пороги качества, то S5 обязателен, а S4 применяется в полном объеме при чёткой геометрии и перекрытии подкадров.
4	Медицинские изображения	S1–S3	Нужен акцент на точности S3, S4 желательно применять лишь по валидированным протоколам.
5	Промышленная робототехника	S0–S3	Следует минимизировать затраты на S1, можно отказаться от полного S4, использовать только робастные процессы для S3.

Резюмируя вышесказанное, можно конкретизировать, что:

1. Если нужна глобальная визуальная сцена/панорама, то можно полноценно использовать все этапы до S4–S5.
2. Если ограничены связь/энергия, то можно держать результаты S2–S3 локально, распределять «тяжёлые» в вычислительном плане этапы (Sx), в S4 выполнять на сервере.
3. При сильных искажениях (шум/размытие/геометрия), следует начинать с шага S1, затем выполнять S2–S3, откладывая S4 до стабилизации/калибровки между подкадрами.

4.5 Сравнение предложенного способа обработки информации с нейросетевыми подходами

Сравнение предложенного способа обработки информации с нейросетевыми подходами в настоящей работе проводится не только по критерию визуального улучшения результата, но прежде всего по критериям метрической достоверности, предсказуемости формируемой геометрической структуры, устойчивости к локальным искажениям и вычислительной реализуемости на мобильных устройствах с ограниченными ресурсами.

Проведенные исследования выполнялись по следующей методике. Для начала сформировались следующие сценарии для сравнения:

А. Использование подкадров LR одной сцены с перекрытиями (типичные для решаемой задачи на группе мобильных устройств).

В. Использование единого «опорного» LR-шаблона сцены.

С. Использование разных условий обработки данных: шум/размытие/геометрические искажения.

Затем были сформированы последовательности реализации алгоритмов (пайплайны для сопоставления):

1. S1: SR (Super Resolution, супер-разрешение) на каждом подкадре, затем сшивка подкадров.

2. S2: сначала сшивка LR, затем SR на целой мозаике подкадров.

3. S3: масштабирование без SR, затем сшивка подкадров (или наоборот).

Далее были сформированы такие же метрики качества, как и для других экспериментов, а после проведено сравнение:

1. Геометрии – считалась ошибка по контрольным точкам, «стыковая» метрика (видимость швов), RMSE гомографий.

2. Фотометрии – выполнялся расчет параметров SSIM/PSNR на областях перекрытия.

3. Стабильности решений – считалась дисперсия текстур в перекрытиях (этот параметр дополнительно показывает «галлюцинации» в разных подкадрах, что бывает характерно для нейросетей).

4. Согласованности – анализировалась межкадровая согласованность спектра частот и гистограмм.

Также были оценены затрачиваемые ресурсы (среднее время (мс/мп иксель), память (МБ), энергозатраты (Дж/кадр), потребность в GPU/NPU/NNAPI, «тепловой бюджет» (сколько минут оставалось до троттлинга вычислителя), и робастность системы (в таких условиях изменения таких параметров как шум, motion blur, экспозиционные сдвиги, перспектива) с критериями сохранения геометрии и отсутствия «дрожащих» швов между подкадрами.

В результате анализа открытых источников, был сделан вывод, что:

1. S1 часто даёт несогласованные текстуры на стыках (каждый подкадр «дорисовывает» по-своему), что хорошо выявляется метриками согласованности/швов.

2. S2 снижает несогласованность, но требует SR на большом полотне – следовательно резко растут память и время, затрачиваемые на решение задачи.

3. SwinIR/EDSR обычно лучше по PSNR/SSIM, но в инженерных задачах перцептуальные «галлюцинации» нейросети недопустимы для реальной ситуации.

В результате сравнения была получены результаты, отображенные в Таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Сравнение предложенного решения с нейросетевыми подходами

№	Аспект решения	Предложенный подход	Нейросетевой подход
1	Геометрическая достоверность	Глобальная привязка к шаблону LR, локальная коррекция контурами, все это метрически устойчиво, швы в сшивках контролируемы.	Присутствует риск геометрических искажений и «галлюцинаций» деталей. При шаге S1 наблюдается рассогласование подкадров, а при S2 требуются буквально огромные ресурсы, неприемлемые для мобильных устройств.

Продолжение Таблицы 4.9

2	Согласованность по швам подкадров	Наблюдается явная коррекция в зонах стыков, можно исправить проблемные зоны дополнительными действиями.	Шаг S1 показывает разные текстуры на соседних подкадрах, что приводит к появлению «швов». Шаг S2 проходит лучше, но очень требователен по ресурсам.
3	Вычислительная модель	Предложенный подход позволяет легко распараллелить вычисления на N устройств, а «тяжёлые» в вычислительном плане шаги, например, можно вынести на внешний сервер при его доступности. Подход отличается динамичностью.	Инференс SR - тяжёлый и монолитный - он плохо делится между многими слабыми устройствами.
4	Требования к аппаратному обеспечению	Предложенное решение CPU-ориентированно, можно работать без GPU, все ускорения локальны.	Требуются GPU/NPU/нейроускорители для адекватной скорости. Иначе время обработки информации увеличивается в разы.
5	Энергопотребление/нагрев устройств	Низкое или среднее. Можно ограничивать частотой устройств, выделением квот на вычислительную мощность, а также распределять на группу устройств.	Высокое. Ожидается частый троттлинг на мобильных SoC без NPU.
6	Связь/трафик	Передается только LR-шаблон и компактные ключевые точки/гомографии/маски без дополнительного трафика.	Необходимо или обрабатывать снимки на месте или передавать большие объемы данных.

Продолжение Таблицы 4.9

7	Устойчивость к шуму	Решение предсказуемо – можно описывать ожидаемые результаты даже до выполнения основных алгоритмов.	Смягчает шум, но может дорисовывать детали, что опасно для выполнения измерений.
8	Лицензирование/внедрение	Применяются только классические библиотеки, что дает независимость от конкретных весов/патентов.	Присутствует зависимость от весов/лицензий/поддержки фреймворков, что сложнее сертифицировать и внедрять.
9	Масштабирование по N устройствам	Показывает почти линейное ускорение до определенного предела.	Практически не масштабируется. Инференс каждого узла сам по себе «тяжёлый» в вычислительном плане.

Из данного анализа можно сделать вывод, что в условиях доступности многих маломощных МО предложенный подход выигрывает по геометрии, объяснимости, устойчивости швов и распределяемости вычислений. SR для нейросетевых методов требует или мощных ускорителей на периферии, или высокопроизводительного канала связи с сервером - что противоречит целевым условиям использования предложенного подхода и постановке задачи. Кроме того, ожидается, что в группе мобильных устройств с низкой стоимостью и вычислительными возможностями отсутствуют необходимые ускорители, а предложенный подход отлично работает на CPU с умеренной памятью. В плане затрат энергии «интеллектуальный» подход характеризуется кратковременными всплесками и пиковыми нагрузками, быстрым нагревом устройств и непрогнозируемыми выбросами энергии. Использование «нейроподобных» структур и алгоритмов в рамках решаемой задачи также может привести к долгому инференсу, а следовательно, к тротлингу и непрогнозируемому времени исполнения.

Принципиальное отличие предлагаемого подхода от нейросетевого повышения разрешения связано с происхождением дополнительной детализации.

Нейросетевые методы восстанавливают отсутствующую информацию на основе статистических закономерностей, усвоенных при обучении на выборке изображений. Сформированные детали способны повысить визуальное качество, однако их метрическая связь с конкретным объектом съёмки и его геометрией не всегда однозначна. В предлагаемом методе информативность увеличивается за счёт композиции реально полученных фрагментов сцены. Каждый дополнительный кадр содержит наблюдение соответствующего участка объекта; после корректной регистрации и геометрического согласования его пиксели могут использоваться как информационно значимые элементы, связанные с реальной структурой сцены.

Для измерительной фотограмметрии также существует риск появления в нейросетевом результате синтетических деталей, которые отсутствуют в исходных наблюдениях. Это ограничивает применение подобных методов там, где требуется метрическая интерпретируемость результата.

Сравнительный анализ показывает, что нейросетевые методы способны давать высокое перцептивное качество, однако при мобильной ресурсно-ограниченной обработке необходимо учитывать вычислительную сложность, вероятность искусственно восстановленных структур и меньшую прозрачность интерпретации. Предлагаемый способ в отдельных сценариях уступает им по выраженности визуального улучшения, но формирует результат более предсказуемо, лучше соответствует требованиям метрической надёжности и допускает распределённую реализацию группой мобильных объектов.

Выводы к главе 4

В главе проведены экспериментальные исследования разработанного метода обработки информации при формировании изображений высокого разрешения, методики организации обработки и алгоритма функционирования группы мобильных

объектов в задачах прикладной фотограмметрии. Экспериментальная проверка выполнялась на реальных изображениях различных типов сцен при воздействии основных деструктивных факторов, характерных для мобильной съёмки и распределённой обработки данных, а именно шумов, размытия и геометрических искажений. Это позволило оценить качество формируемых изображений, устойчивость разработанных решений к ухудшению входных данных, а также их вычислительную и энергетическую эффективность.

В частности, основной эксперимент, подтверждающий работоспособность предложенного метода и алгоритма показывает, что сшивка с контурно-фотограмметрическим уточнением дает рост показателя SSIM в пределах от 0.95 до 0.97 с увеличением числа сегментов относительно показателя для базового снимка координатора 0.79, касательно показателя PSNR растет с 32.14 до 33.86 относительно базового снимка с 24.1. Показатели RMSE достигают корректных значений 0.45 и 0.4959, а ошибка шва показывает положительную динамику с 0.0101 до 0.0099, что определяет превосходное качество снимков, согласно шкалам вербализации этих параметров, указанных в таблице 4.1.

Эксперименты по анализу воздействия шумов и искажений различной природы также показали положительный результат и удержание основных метрик в пределах хорошего и превосходного качества полученных изображений высокого разрешения, несмотря на деградации исходных снимков координатора при высоких значениях шумов и искажений.

С позиции введённого в первой главе показателя «честных пикселей» это означает, что суперпозиция частично перекрывающихся фрагментов действительно обеспечивает рост измерительной информативности результирующего изображения. Выполнение пороговых значений SSIM, PSNR, показателя артефактов и плотности контуров подтверждает, что итоговое изображение содержит не только большее число пикселей номинально, но и сохраняет структурные признаки сцены, необходимые для последующей метрической интерпретации.

Экспериментальная проверка методики организации обработки информации показала, что распределённый подход обеспечивает согласованную работу группы

мобильных объектов и позволяет снизить вычислительные и энергетические затраты по сравнению с последовательной обработкой. Распараллеливание процесса обработки информации при формировании изображений высокого разрешения в ходе проведенных экспериментов обеспечило ускорение в 1,98–10,98 раза.

Показано, что разработанный алгоритм распределённой обработки информации обеспечивает практическую реализуемость предложенных решений в условиях групповой работы мобильных объектов. Дополнительно установлено, что наибольшая практическая эффективность достигается при использовании малой группы мобильных объектов, когда выигрыш от распараллеливания ещё не компенсируется ростом накладных расходов на синхронизацию и сбор результатов.

Эксперименты подтвердили, что снижение требований к аппаратному обеспечению по критерию K_{HW} достигается переходом от одиночного кадра мобильной камеры к согласованной суперпозиции частично перекрывающихся фрагментов сцены. Распределённая обработка сокращает время получения требуемого набора информативных фрагментов, а контурное уточнение повышает геометрическую согласованность областей сшивки и устойчивость итогового изображения.

Результаты главы 4 подтверждают совместимость разработанных метода, методики и алгоритма и возможность их комплексного применения для решения поставленной научно-технической задачи – формирования изображений высокого разрешения средствами группы мобильных объектов при заданных ограничениях по качеству результата, времени обработки и энергетическим затратам.

Полученные данные обосновывают предложенные решения и формируют основу для их дальнейшего практического применения в мобильных распределённых системах получения и обработки изображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача разработки метода, методики и алгоритма организации обработки информации при решении задач прикладной фотограмметрии на базе мобильных объектов, обеспечивающих снижение аппаратных требований к системам формирования изображений высокого разрешения при сохранении требуемых показателей качества, времени обработки и энергетической эффективности. Актуальность решения данной задачи обусловлена необходимостью расширения возможностей прикладной фотограмметрии в условиях ограниченных вычислительных, энергетических и коммуникационных ресурсов, характерных для мобильных и распределённых систем получения и обработки изображений.

В ходе исследования проведён анализ современных подходов к организации обработки информации при формировании изображений высокого разрешения в задачах прикладной фотограмметрии.

Показано, что существующие решения в значительной степени ориентированы либо на использование централизованных вычислительных средств, либо на применение дорогостоящих и высокопроизводительных средств получения изображений, что ограничивает их использование в мобильных сценариях с ограниченными ресурсами.

Проведённый анализ выявил, что в распределённых мобильных системах эффективность формирования изображений высокого разрешения определяется не только алгоритмами обработки, но и организацией вычислительного процесса: распределением заданий, координацией устройств и согласованием промежуточных результатов. С учётом этого сформулированы ограничения и критерии эффективности, охватывающие качество результирующего изображения, время его формирования, вычислительную и энергетическую нагрузку на отдельные устройства и требования к аппаратным средствам получения данных.

Основным научным результатом работы является метод обработки информации при формировании изображений высокого разрешения на основе суперпозиции частично перекрывающихся фрагментов сцены. В качестве единой пространственной основы используется изображение низкого разрешения. Относительно него фрагменты сначала регистрируются по ключевым точкам, после чего их положение локально уточняется по контурной информации.

Информативность результата увеличивается за счёт фактически зарегистрированных фрагментов, а не за счёт искусственного восстановления деталей одиночного изображения. Благодаря этому сохраняется связь пикселей с геометрически значимыми элементами объекта.

Вторым научным результатом стала методика организации обработки информации группой мобильных объектов. Она распределяет функции между участниками и предусматривает параллельное получение фрагментов высокого разрешения, их первичную обработку и предварительную привязку к шаблону низкого разрешения; часть операций контурного анализа также выполняется распределённо.

Такая организация перераспределяет нагрузку внутри группы, снижает требования к отдельному мобильному объекту и сокращает время формирования изображения по сравнению с последовательным выполнением полного цикла. Методика ориентирована на группы ограниченного состава, работающие при ограниченной связности, неоднородных аппаратных характеристиках и различном объёме доступных ресурсов.

Третьим результатом является алгоритм функционирования мобильного объекта в составе группы. Он основан на принципах мультиагентного взаимодействия и задаёт порядок координации участников, выбора ролей, распределения подзадач, локальной обработки фрагментов и последующей интеграции частных результатов.

Показано, что разработанный алгоритм обеспечивает практическую реализуемость распределённой обработки в группе мобильных объектов. Использование алгоритма обеспечило практическую реализуемость предложенных метода и методики в условиях согласованной групповой работы мобильных объектов.

Для проверки работоспособности и эффективности разработанных решений создана программная модель, реализующая предложенные метод, методику и алгоритм, а также проведены экспериментальные исследования в условиях, приближённых к реальным сценариям мобильной съёмки и распределённой обработки данных.

Результаты экспериментов показали, что предложенный метод позволил снизить аппаратные требования (K_{HW}) к отдельному устройству в части камеры в 2 раза, а применение методики и алгоритма – снизить временные затраты на формирование изображения от 1,98 раз до 10,98 раз для 2–20 устройств.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что поставленная в диссертационной работе цель достигнута. Разработанные метод, методика и алгоритм в совокупности обеспечивают решение задачи формирования изображений высокого разрешения в системах прикладной фотограмметрии на базе мобильных объектов и их групп с уменьшением требований к аппаратным средствам получения данных, снижением нагрузки на отдельные устройства и обеспечением приемлемых временных и энергетических характеристик обработки.

Дальнейшее развитие работы связано с применением методики в более сложных сценариях динамической съёмки и с совершенствованием адаптивного распределения ролей и задач с учётом состояния среды, доступных ресурсов и требований к результату. Отдельное направление составляет интеграция предлагаемого подхода с методами трёхмерной реконструкции и автоматизированного анализа структуры изображений при сохранении метрической достоверности данных и возможности выполнения вычислений на мобильных ресурсно-ограниченных устройствах.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

МО – мобильный объект

LR – низкое разрешение

HR – высокое разрешение

SSIM – Structural Similarity Index Measure

PSNR – Peak Signal-to-Noise Ratio

SIFT – Scale-Invariant Feature Transform

ORB – Oriented FAST and Rotated BRIEF

RANSAC – Random Sample Consensus

RMSE – Root Mean Squared Error Reprojection error

IoT – Internet of Things

LiDAR – Light Detection and Ranging

CPU – central processing unit

GPU – graphics processing unit

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51833–2001. Фотограмметрия. Термины и определения. - Введ. 2002-07-01. - М.: Стандартиформ, 2002.
2. *Tanenbaum, A. S.* Distributed Systems: Principles and Paradigms / A. S. Tanenbaum, M. van Steen. - Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. - 803 p.
3. *Melnik E. V.* Method for Integrating of Groups of Mobile Robots in Reconfigurable Monitoring Systems at the Base of CUBESATs / Melnik E. V., Orda-Zhigulina M. V., Garyagdiev A. M., Kozlovskiy A. V. // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – Vol. 934. – P. 192-197. – DOI 10.1007/978-3-031-54813-0_18.
4. *Загоруйко, Н. Г.* Методы распознавания и их применение / Н. Г. Загоруйко. - М.: Сов. радио, 1972. - 208 с.
5. *Тихонов, А. Н.* Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация / А. Н. Тихонов, А. В. Гончарский, В. В. Степанов, А. Г. Ягола. - М.: Наука, 1983. - 200 с.
6. *Лебедев, Д. С.* Иконика: Теория и методы обработки изображений: сб. ст. / АН СССР, Ин-т проблем передачи информ.; отв. ред.: Д. С. Лебедев, Н. Р. Попова. - М.: Наука, 1983. - 154 с.
7. *Мирошников, М. М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов / М. М. Мирошников. - М.: Машиностроение, 1983. - 696 с.
8. *Бонгард, М. М.* Проблема узнавания / М. М. Бонгард. - М.: Наука, 1967. - 320 с.
9. *Rosenfeld, A.* Digital Picture Processing / A. Rosenfeld, A. C. Kak. - 2nd ed. - Orlando: Academic Press, 1982.
10. *Pratt, W. K.* Digital Image Processing / W. K. Pratt. - 2nd ed. - New York: Wiley, 1991. — DOI:10.1002/0470097434.
11. *Jain, A. K.* Fundamentals of Digital Image Processing / A. K. Jain. - Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989. - 569 p.
12. *Каляев, А. В.* Многопроцессорные вычислительные системы с программируемой архитектурой / А. В. Каляев. - М.: Радио и связь, 1984. - 240 с.

13. *Каляев, А. В.* Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений: монография / А. В. Каляев, И. И. Левин. - М.: Янус-К, 2003. - 380 с.
14. *Воеводин, Вл. В.* Параллельные вычисления / Вл. В. Воеводин, В. В. Воеводин. - СПб.: БХВ-Петербург, 2002. - 608 с.
15. *Каляев, И. А.* Методы и средства повышения безопасности и сокращения времени операций с ядерным топливом на АЭС с реактором типа ВВЭР-1000: монография / И. А. Каляев, В. В. Коробкин, Э. В. Мельник, М. В. Хисамутдинов; Южный федеральный университет; под ред. И. А. Каляева [и др.]. - Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2014. - 208 с.: ил.
16. *Левин, И. И.* К вопросу об автоматическом создании параллельных прикладных программ для реконфигурируемых вычислительных систем // Вычислительные технологии. - 2020. - Т. 25, № 1. - С. 66–81.
17. *Павский, В. А.* Оценка показателей осуществимости решения задач на распределённых вычислительных системах / В. А. Павский, К. В. Павский // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. - 2008. - № 4(5). - С. 61–68.
18. *Ватутин, Э. И.* Проектирование логических мультиконтроллеров. Синтез разбиений параллельных граф-схем алгоритмов: монография / Э. И. Ватутин. - Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. - 292 с.
19. *Тель, Ж.* Введение в распределённые алгоритмы: пер. с англ. / Ж. Тель. - М.: МЦНМО, 2009. - 616 с.
20. *Lamport, L.* Time, Clocks, and the Ordering of Events in a Distributed System // Communications of the ACM. - 1978. - Vol. 21, No. 7. - P. 558–565. – DOI: 10.1145/359545.359563.
21. *Amdahl, G. M.* Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities / G. M. Amdahl // Proceedings of the April 18-20, 1967, Spring Joint Computer Conference — AFIPS '67 (Spring). — New York: Association for Computing Machinery, 1967. — P. 483–485. — DOI: 10.1145/1465482.1465560.

22. *Новиков, Д. А.* Математические модели формирования и функционирования команд / Д. А. Новиков. - М.: Физматлит, 2008. - 184 с.
23. *Васильев, С. Н.* Интеллектуальные мультиагентные информационно-управляющие системы ОАО «РЖД» на основе предсказательного моделирования и систем автоматизации имитационных исследований облачного типа / С. Н. Васильев, А. В. Ахметзянов, Н. Н. Бахтадзе, С. А. Власов, Е. М. Максимов, В. В. Девятков // Сборник трудов научных партнеров ОУС ОАО «РЖД» «Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта». - М.: Интекст, 2013. - С. 38–44.
24. *Городецкий, В. И.* Многоагентные системы: современное состояние исследований и перспективы применения // Новости искусственного интеллекта. - 1996. - № 1. - С. 44–59.
25. *Каляев, И. А.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. - М.: Физматлит, 2009. - 292 с.
26. *Веселов, Г. Е.* Синергетический подход к управлению группой мобильных роботов / Г. Е. Веселов, А. А. Скляров, С. А. Скляров // Системный синтез и прикладная синергетика (ССПС-2015): сборник трудов 7-й Всероссийской научной конференции. - 2015.
27. *Лебедев, Б. К.* Децентрализованное управление группой автономных подвижных объектов при формировании траектории движения / Б. К. Лебедев, О. Б. Лебедев, М. И. Бесхмельнов // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2024. - № 6 (242).
28. *Пшихопов, В. Х.* Групповое управление движением мобильных роботов в неопределённой среде с использованием неустойчивых режимов / В. Х. Пшихопов, М. Ю. Медведев // Труды СПИИРАН. - 2018. - Т. 60, № 5. - С. 39–63.
29. *Городецкий, В. И.* Многоагентные технологии для промышленных приложений: реальность и перспектива / В. И. Городецкий, П. О. Скобелев // Труды СПИИРАН. - 2017. - Вып. 55.

30. Lowe, D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints / D. G. Lowe // *Int. J. Comput. Vis.* — 2004. — Vol. 60, no. 2. — P. 91–110. — ISSN 0920-5691. — DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
31. Brown, M. Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features / M. Brown, D. G. Lowe // *Int. J. Comput. Vis.* — 2007. — Vol. 74, no. 1. — P. 59–73. — ISSN 0920-5691. — DOI: 10.1007/s11263-006-0002-3.
32. Fischler, M. A., Bolles, R. C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // *Communications of the ACM*. - 1981. — DOI: 10.1145/358669.358692.
33. Szeliski, R. Image alignment and stitching: A tutorial // *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*. - 2006. - Vol. 2, No. 1. – P. 1–104. DOI: 10.1561/06000000009.
34. Самойлов, А. Н. Актуальные направления развития систем прикладной фотограмметрии / А. Н. Самойлов, А. В. Козловский, А. М. Гарягдыев, Я. Э. Мельник // Исследования и творческие проекты для развития и освоения проблемных и прибрежно-шельфовых зон юга России: сборник трудов XV Всероссийской школы-семинара молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников, Геленджик, 15-17 мая 2024 г. / сост. Ю. Б. Щемелева, С. В. Кирильчик. - Таганрог: Изд-во Южного федерального ун-та, 2024. - С. 373–376.
35. Kačuch, P. Comparison of Contact and Contactless Measuring Methods for Form Evaluation / P. Kačuch, M. Dovica, S. Slosarč'k [et al.] // *Procedia Engineering*. — 2012. — Vol. 48. — P. 273–279. — ISSN 1877-7058. — DOI: 10.1016/j.pro-eng.2012.09.514.
36. Petrie, G. Digital Photogrammetric Workstations 1992–96 / G. Petrie, A. Walker // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* — 1996. — Vol. 31, Part B3. — P. 384–395. — ISSN 1682-1750.
37. Zhang, Z. VirtuoZo Digital Photogrammetry System and Its Theoretical Foundation and Key Algorithms / Z. Zhang // *International Archives of the Photogram-*

metry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — XVIII ISPRS Congress; Vienna, Austria, 9–19 July 1996. — Vol. XXXI, Part B2. — Vienna : ISPRS, 1996. — P. 424–429.

38. *Remondino, F.* Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons / F. Remondino, C. Fraser // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Commission V Symposium; Vienna, Austria, 26–28 September 2005. — Vol. XXXVI, Part 5. — Vienna : ISPRS, 2005. — P. 266–272.

39. *Barazzetti, L.* True-orthophoto generation from UAV images: Implementation of a combined photogrammetric and computer vision approach / L. Barazzetti, R. Brumana, D. Oreni [et al.] // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Technical Commission II Symposium; 6–8 October 2014, Denver, Colorado, USA. — Vol. II-5. — Gottingen: Copernicus Publications, 2014. — P. 57–63. — ISSN 2194-9042. — DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-57-2014.

40. *Patonis P.* Comparative Evaluation of the Performance of a Mobile Device Camera and a Full-Frame Mirrorless Camera in Close-Range Photogrammetry Applications // Sensors. - 2024. - Vol. 24, No. 15. - Art. 4925. DOI: —10.3390/s24154925.

41. *Sukri, S. I.* Pixel Binning Effects of Smartphone Camera on Three-Dimensional (3D) Model Reconstructed Crime Scene / S. I. Sukri, M. F. Mohd Ariff, A. F. Razali, K. Zainuddin, A. R. Yusof // Engineering, Technology & Applied Science Research. — 2024. — Vol. 14, no. 5. — P. 16895–16902. – DOI: 10.48084/etasr.8309.

42. ГОСТ 25502–82. Объективы. Метод определения фотографической разрешающей способности. - Введ. 01.01.1984. - М.: Издательство стандартов, 1983.

43. AF Zoom-Nikkor 24-85mm f/2.8-4D IF on Nikon D800E vs AF-S Nikkor 16-35mm f/4G ED VR on Nikon D800E [Электронный ресурс] // DXOMARK. — URL: https://www.dxomark.com/Lenses/Compare/Side-by-side/AF-Zoom-Nikkor-24-85mm-f-2.8-4D-IF-on-Nikon-D800E-versus-AF-S-Nikkor-16-35mm-f-4G-ED-VR-on-Nikon-D800E__171_814_373_814 (дата обращения: 04.02.2026).

44. Remondino, F. Image-based 3D modelling: A review / F. Remondino, S. El-Hakim // *The Photogrammetric Record*. — 2006. — Vol. 21, № 115. — P. 269–291. — DOI:10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x.
45. Lo Brutto, M. 3D Modelling of a Historical Building Using Close-Range Photogrammetry and Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) / M. Lo Brutto, D. Ebolese, G. Dardanelli // *ISPRS Archives*. — 2018. — Vol. XLII-2. — P. 599–606. — DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-599-2018.
46. Tanskanen, P. Live Metric 3D Reconstruction on Mobile Phones / P. Tanskanen, K. Kolev, L. Meier [et al.] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2013)*, Sydney, Australia, December 1–8, 2013. — P. 65–72. — DOI:10.1109/ICCV.2013.15.
47. Gonizzi Barsanti, S. Critical Factors and Guidelines for 3D Surveying and Modelling in Cultural Heritage / S. Gonizzi Barsanti, F. Remondino, B. Jiménez Fernández-Palacios, D. Visintini // *International Journal of Heritage in the Digital Era*. — 2014. — Vol. 3, № 1. — P. 141–158. — DOI: 10.1260/2047-4970.3.1.141.
48. La Salandra, M. Generating UAV high-resolution topographic data within a FOSS photogrammetric workflow using high-performance computing clusters / M. La Salandra, G. Miniello, S. Nicotri [et al.] // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* — 2021. — Vol. 105, art. 102600. — ISSN 1569-8432. — DOI: 10.1016/j.jag.2021.102600.
49. Xu, J. Developing a digital twin model for monitoring building structural health by combining a building information model and a real-scene 3D model / J. Xu, X. Shu, P. Qiao, S. Li, J. Xu // *Measurement*. — 2023. — Vol. 217. — Art. 112955. — DOI: 10.1016/j.measurement.2023.112955.
50. Niu, W. A UAV Image Stitching Method for Complex Urban Environments / W. Niu, D. Qiu, R. Wu, Z. Wang, Y. Shi // *ISPRS Archives*. — 2025. — Vol. XLVIII-G-2025. — P. 1123–1129. — DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-G-2025-1123-2025.
51. Bill, R. Geospatial Information Research: State of the Art, Case Studies and Future Perspectives / R. Bill, J. Blankenbach, M. Breunig [et al.] // *Photogramm. Fernerkund. Geoinf.* — 2022. — Vol. 90. — P. 349–389. — ISSN 1432-8364. — DOI: 10.1007/s41064-022-00217-9.

52. Woo, H.-J. Localization of Cracks in Concrete Structures Using an Unmanned Aerial Vehicle / H.-J. Woo, D.-M. Seo, M.-S. Kim, M.-S. Park, W.-H. Hong, S.-C. Baek // *Sensors*. — 2022. — Vol. 22, № 17. — Art. 6711. — DOI: 10.3390/s22176711.
53. Lu, T. A novel methodology for the path alignment of visual SLAM in indoor construction inspection / T. Lu, S. Tervola, X. Lü [et al.] // *Automation in Construction*. — 2021. — Vol. 127. — Art. 103723. — DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103723.
54. Ciminello, M. Preliminary Results of a Structural Health Monitoring System Application for Real-Time Debonding Detection on a Full-Scale Composite Spar / M. Ciminello, B. Sikorski, B. Galasso [et al.] // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23, no. 1, art. 455. — ISSN 1424-8220. — DOI: 10.3390/s23010455.
55. Büyüktas, B. Learning Across Decentralized Multi-Modal Remote Sensing Archives with Federated Learning / B. Büyüktas, G. Sumbul, B. Demir // *arXiv preprint*. — 2023. — Art. arXiv:2306.00792v1. — DOI: 10.48550/arXiv.2306.00792.
56. Perko, R. Mapping with Pléiades — End-to-End Workflow / R. Perko, H. Raggam, P. M. Roth // *Remote Sensing*. — 2019. — Vol. 11, № 17. — Art. 2052. — DOI: 10.3390/rs11172052.
57. Gargari, A. M. Dynamic 3D network design for UAV-based photogrammetry in mountainous terrain / A. M. Gargari, H. Ebadi, F. Esmaili, S. Latifzadeh // *Environmental Earth Sciences*. — 2023. — Vol. 82. — Art. 7. — DOI: 10.1007/s12665-023-10864-9.
58. Nex, F. Towards Real-Time Building Damage Mapping with Low-Cost UAV Solutions / F. Nex, D. Duarte, A. Steenbeek [et al.] // *Remote Sens.* — 2019. — Vol. 11, no. 3, art. 287. — ISSN 2072-4292. — DOI: 10.3390/rs11030287.
59. Jakopec, I. Accuracy Analysis of a New Data Processing Method for Landslide Monitoring Based on Unmanned Aerial System Photogrammetry / I. Jakopec, A. Marendić, I. Grgac // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23, № 6. — Art. 3097. — DOI: 10.3390/s23063097.
60. Bentivoglio, R. Deep learning methods for flood mapping: a review of existing applications and future research directions / R. Bentivoglio, E. Isufi, S. N. Jonkman,

R. Taormina // *Hydrology and Earth System Sciences*. — 2022. — Vol. 26. — P. 4345–4378. — DOI: 10.5194/hess-26-4345-2022.

61. Saha, S. Semisupervised Change Detection Using Graph Convolutional Network / S. Saha, L. Mou, X. X. Zhu, F. Bovolo, L. Bruzzone // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. — 2021. — Vol. 18, № 4. — P. 607–611. — DOI:10.1109/LGRS.2020.2985340.

62. Chen, X. A Pavement Crack Detection and Evaluation Framework for a UAV Inspection System Based on Deep Learning / X. Chen, C. Liu, L. Chen [et al.] // *Appl. Sci.* — 2024. — Vol. 14, no. 3, art. 1157. — ISSN 2076-3417. — DOI: 10.3390/app14031157.

63. Tan, Y. UAV Photogrammetry-Based 3D Road Distress Detection / Y. Tan, Y. Li // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. — 2019. — Vol. 8, № 9. — Art. 409. — DOI: 10.3390/ijgi8090409

64. Li, Y. Cross-scene pavement distress detection by a novel transfer learning framework / Y. Li, P. Che, C. Liu [et al.] // *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.* — 2021. — Vol. 36, no. 11. — P. 1398–1415. — ISSN 1093-9687. — DOI: 10.1111/mice.12674.

65. Litjens, G. A survey on deep learning in medical image analysis / G. Litjens [et al.] // *Medical Image Analysis*. — 2017. — Vol. 42. — P. 60–88. — DOI: 10.1016/j.media.2017.07.005.

66. Guo, P. Multi-institutional Collaborations for Improving Deep Learning-based Magnetic Resonance Image Reconstruction Using Federated Learning / P. Guo, P. Wang, J. Zhou [и др.] // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 20–24, 2021, Nashville, TN, USA. — 2021. — P. 2423–2432. — DOI: 10.1109/cvpr46437.2021.00245.

67. Esteva, A. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks / A. Esteva, B. Kuprel, R. A. Novoa [et al.] // *Nature*. — 2017. — Vol. 542, № 7639. — P. 115–118. — DOI: 10.1038/nature21056.

68. Han, X.-F. Image-Based 3D Object Reconstruction: State-of-the-Art and Trends in the Deep Learning Era / X.-F. Han, H. Laga, M. Bennamoun // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. — 2021. — Vol. 43, № 5. — P. 1578–1604. — DOI: 10.48550/arXiv.1906.06543.
69. Sistaninejhad, B. A. Review Paper about Deep Learning for Medical Image / B. Sistaninejhad, H. Rasi, P. Nayeri // *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. — 2023. — Art. 5518367. — P. 1–10. — DOI: 10.1155/2023/7091301.
70. Remondino, F. Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning / F. Remondino // *Remote Sensing*. — 2011. — Vol. 3, № 6. — P. 1104–1138. — DOI: 10.3390/rs3061104.
71. Arias, F. Hyperspectral imaging for rice cultivation: Applications, methods and challenges / F. Arias [et al.] // *AIMS Agriculture and Food*. — 2021. — Vol. 6, № 1. — P. 273–307. — DOI: 10.3934/agrfood.2021018.
72. Masson-MacLean, E. Digitally Recording Excavations on a Budget: A (Low-Cost) DIY Approach from Scotland / E. Masson-MacLean, J. O'Driscoll, C. McIver, G. Noble // *Journal of Field Archaeology*. — 2021. — Vol. 46, № 8. — P. 709–725. — DOI: 10.1080/00934690.2021.1970444.
73. Xu, Q. Multitemporal UAV-based photogrammetry for landslide detection and monitoring in a large area: a case study in the Heifangtai terrace in the Loess Plateau of China / Q. Xu, W.-L. Li, Y.-Z. Ju, X.-J. Dong, D.-L. Peng // *Journal of Mountain Science*. — 2021. — Vol. 18. — P. 1826–1839. — DOI: 10.1007/s11629-020-6064-9.
74. Zickler, T. Reflectance sharing: predicting appearance from a sparse set of images of a known shape / T. Zickler, R. Ramamoorthi, P. N. Belhumeur // *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* — 2006. — Vol. 28, no. 8. — P. 1287–1302. — ISSN 0162-8828. — DOI: 10.1109/TPAMI.2006.170.
75. Barazzetti, L. Orientation and 3D modelling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation / L. Barazzetti, M. Scaioni, F. Remondino // *The Photogrammetric Record*. — 2010. — Vol. 25, № 132. — P. 356–381. — DOI: 10.1111/j.1477-9730.2010.00599.x.

76. Zhang, Y. Seamline optimisation for urban aerial ortho-image mosaicking using graph cuts / Y. Zhang, M. Zhang, S. Du, Z. Zou, C. Fan // *The Photogrammetric Record*. — 2018. — Vol. 33, № 161. — P. 131–147. — DOI: 10.1111/phor.12232.

77. Soilan, M. Review of Laser Scanning Technologies and Their Applications for Road and Railway Infrastructure Monitoring / M. Soilan, A. Sánchez-Rodríguez, P. del Río-Barral, C. Perez-Collazo, P. Arias, B. Riveiro // *Infrastructures*. — 2019. — Vol. 4, № 4. — Art. 58. — DOI: 10.3390/infrastructures4040058.

78. Fraser, C. S. State of the Art in Industrial Photogrammetry // *ISPRS Proceedings XXVII Congress, Part 5*. - 1988. - P. 166–177.

79. Ratna Babu, K. A New Approach To Enhance Images Of Mobile Phones With In-Built Digital Cameras Using Mean And Variance / K. Ratna Babu, K. V. N. Sunitha // *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Engineering (ACE)*: [сборник трудов], 16–17 June 2010, Mysore, India. — Piscataway, NJ : IEEE, 2010. — P. 232–234. — DOI: 10.1109/ACE.2010.57.

80. Ignatov, A. WESPE: Weakly supervised photo enhancer for digital cameras / A. Ignatov, N. Kobyshev, R. Timofte, K. Vanhoey, L. Van Gool // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, June 18–22, 2018, Salt Lake City, UT, USA. — Piscataway, NJ : IEEE, 2018. — Art. 00112. — DOI: 10.48550/arXiv.1709.01118.

81. Noda, M. Road Image Update using In-Vehicle Camera Images and Aerial Image / M. Noda, T. Takahashi, D. Deguchi [и др.] // *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 5–9 June 2011, Baden-Baden, Germany. — Piscataway, NJ: IEEE, 2011. — P. 73–78. — DOI: 10.1109/IVS.2011.5940470.

82. Bendoumi, M. A. Hyperspectral image resolution enhancement using high-resolution multispectral image based on spectral unmixing / M. A. Bendoumi, M. He, S. Mei // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2014. — Vol. 52, № 10. — P. 6574–6583. — DOI: 10.1109/TGRS.2014.2298056.

83. Zhang, C. Personal photograph enhancement using internet photo collections / C. Zhang, J. Gao, O. Wang [и др.] // *IEEE Transactions on Visualization and*

Computer Graphics. — 2014. — Vol. 20, № 2. — P. 262–275. — DOI: 10.1109/TVCG.2013.77.

84. Xu, Y. Real-time guidance camera interface to enhance photo aesthetic quality / Y. Xu, J. Ratcliff, J. Scovell, G. Speiginer, R. Azuma // *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. - 2015-April. - P. 1183–1186. — DOI: 10.1145/2702123.270241.

85. Самойлов, А. Н. Подход к получению цифровых изображений высокого разрешения помощью камеры мобильного устройства / А. Н. Самойлов, М. С. Кучерова, Н. Е. Сергеев // IX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика». — DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-346-351.

86. Самойлов, А. Н. Метод фотограмметрического измерения геометрических параметров объектов, инвариантный к фоторегистрирующим устройствам / А. Н. Самойлов, Н. Е. Сергеев, А. В. Волошин, А. В. Козловский // Вестник АГУ. — 2021. — Вып. 4 (291). — С. 58–69. — DOI: 10.53598/2410-3225-2021-4-291-58-69.

87. Козловский, А. В. О подходе к распределённой обработке информации в системах прикладной фотограмметрии на базе мобильных устройств // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых учёных и специалистов. - 2024. - С. 114–115.

88. Liang, J. SwinIR: Image Restoration Using Swin Transformer / J. Liang, J. Cao, G. Sun, K. Zhang, L. Van Gool, R. Timofte // In: ICCV Workshops (AIM), 2021. - P. 1833–1844. — DOI: 10.48550/arXiv.2108.10257.

89. Lim, B. Enhanced Deep Residual Networks for Single Image Super-Resolution / B. Lim, S. Son, H. Kim, S. Nah, K.-M. Lee // In: CVPR Workshops (NTIRE), 2017. — DOI: 10.48550/arXiv.1707.02921.

90. Wang, X. ESRGAN: Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks / X. Wang, K. Yu, S. Wu, J. Gu, Y. Liu, C. Dong, C.-C. Loy, Y. Qiao, X. Tang // In: Computer Vision – ECCV 2018 Workshops, LNCS 11133 / eds.: Springer, 2019. - P. 63–79. — DOI: 10.1007/978-3-030-11021-5_5.

91. Wang, X. Real-ESRGAN: Training Real-World Blind Super-Resolution with Pure Synthetic Data / X. Wang, L. Xie, C. Dong, Y. Shan // In: ICCV Workshops (AIM), 2021. — DOI: 10.1109/ICCVW54120.2021.00217.
92. Lang Nie Unsupervised Deep Image Stitching: Reconstructing Stitched Features to Images / Lang Nie, Chunyu Lin, Kang Liao, Shuaicheng Liu, Yao Zhao // arXiv. - 2021. - Pp. 1–14. — DOI: 10.48550/arXiv.2106.12859.
93. Soltanpour, S. A Survey on Feature-Based and Deep Image Stitching / S. Soltanpour, C. Joslin // *Proceedings of the 20th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2025)* — Volume 3: VISAPP, February 26–28, 2025, Porto, Portugal. — Setúbal: SCITEPRESS, 2025. — P. 777–788. — DOI: 10.5220/0013368500003912.
94. Kim, M. Implicit Neural Image Stitching With Enhanced and Blended Feature Reconstruction / M. Kim, J. Lee, B. Lee [и др.] // *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, January 4–8, 2024, Waikoloa, HI, USA. — Piscataway, NJ: IEEE, 2024. — P. 4087–4096. — DOI: 10.48550/arXiv.2309.01409.
95. Xu, S. Local Feature Matching Using Deep Learning: A Survey / S. Xu, S. Chen, R. Xu [и др.] // *Information Fusion*. — 2024. — Vol. 107. — Art. 102344. — DOI: 10.1016/j.inffus.2024.102344.
96. Sarlin, P.-E. SuperGlue: Learning Feature Matching with Graph Neural Networks / P.-E. Sarlin, D. DeTone, T. Malisiewicz, A. Rabinovich // *CVPR*. - 2020. - Pp. 4938–4947. — DOI: 10.48550/arXiv.1911.11763.
97. Dusmanu, M. D2-Net: A Trainable CNN for Joint Description and Detection of Local Features / M. Dusmanu, I. Rocco, T. Pajdla, M. Pollefeys, J. Sivic, A. Torii, T. Sattler // *CVPR*. - 2019. - Pp. 8092–8101.
98. Revaud, J. R2D2: Repeatable and Reliable Detector and Descriptor / J. Revaud, P. Weinzaepfel, C. R. De Souza, N. Pion, G. Csurka, Y. Cabon, M. Humenberger // *NeurIPS*. - 2019. - Pp. 1–11.
99. Sun, J. LoFTR: Detector-Free Local Feature Matching with Transformers / J. Sun, Z. Shen, Y. Wang, H. Bao, X. Zhou // *CVPR*. - 2021. - Pp. 8922–8931.

100. Zhao, X. ALIKE: Accurate and Lightweight Keypoint Detection and Descriptor Extraction / X. Zhao, X. Wu, J. Miao [и др.] // *IEEE Transactions on Multimedia*. — 2022. — Vol. 24. — P. 3961–3975. — DOI: 10.1109/TMM.2022.3155927.
101. Tang, S. QuadTree Attention for Vision Transformers / S. Tang, J. Zhang, S. Zhu, P. Tan // *ICLR*. - 2022. - Pp. 1–19. — DOI: 10.48550/arXiv.2201.02767.
102. Bromley, J. Signature Verification using a Siamese Time Delay Neural Network / J. Bromley, J. W. Bentz, L. Bottou [и др.] // *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. — 1993. — Vol. 7, № 4. — P. 669–688. — DOI: 10.1142/s0218001493000339.
103. Qin, C. Unsupervised Image Stitching Based on Generative Adversarial Networks and Feature Frequency Awareness Algorithm / C. Qin, X. Ran, D. Zhang [et al.] // *Applied Soft Computing*. — 2025. — Vol. 183. — Art. 113466. — DOI: 10.1016/j.asoc.2025.113466.
104. Karras, T. A Style-Based Generator Architecture for Generative Adversarial Networks / T. Karras, S. Laine, T. Aila // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. — Long Beach, CA, USA, 2019. — Pp. 4396–4405. — DOI: 10.1109/CVPR.2019.00453.
105. Yang, L. Diffusion Models: A Comprehensive Survey of Methods and Applications / L. Yang, Z. Zhang, Y. Song [et al.] // *ACM Computing Surveys*. — 2023. — arXiv:2209.00796. — DOI: 10.48550/arXiv.2209.00796.
106. Dosovitskiy, A. An Image is Worth 16×16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale / A. Dosovitskiy, L. Beyer, A. Kolesnikov [et al.] // *ICLR (Open-Review)*. — 2021(2020 preprint). — Pp. 1–21. — arXiv:2010.11929. — DOI: 10.48550/arXiv.2010.11929.
107. Vaswani, A. Attention Is All You Need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar [et al.] // *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*. — Long Beach, CA, USA, 2017. — Pp. 5998–6008. — arXiv:1706.03762. — DOI: 10.48550/arXiv.1706.03762.

108. *Козловский, А.В.* Применение больших языковых моделей при организации пополнения базы знаний о методах обработки информации в системах прикладной фотограмметрии / А.В. Козловский, Э.В. Мельник, А.Н. Самойлов // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2024. — №3 (239). — С. 243–252. — DOI: 10.18522/2311–3103-2024-3-243-252.

109. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024666026 Российская Федерация. Онтологическая модель для автоматизированного пополнения данных для синтеза систем прикладной фотограмметрии: № 2024664694: заявл. 28.06.2024: опубл. 09.07.2024 / Козловский А. В., Волощук В.И.; правообладатель(и) ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет».

110. *Kozlovskiy, A.V.* An ontological model for the automated data replenishment method implementation for the synthesis of applied photogrammetry systems / A.V. Kozlovskiy, Y.E. Melnik, V.I. Voloshchuk // 2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). — Sochi, Russian Federation: IEEE, 2024. — Pp. 892–897. — DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694212.

111. *Козловский, А. В.* Исследование возможности применения онтологий при решении задач прикладной фотограмметрии / А. В. Козловский, Е. В. Лищенко, Я. Э. Мельник // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: сборник статей X Всероссийской научно-технической конференции. - 2024. - С. 247–248.

112. *Drap, P.* Ontology-Based Photogrammetry Survey for Medieval Archaeology: Toward a 3D Geographic Information System (GIS) / P. Drap, O. Papini, E. Pruno [et al.] // Geosciences. — 2017. — Vol. 7, № 4. — Art. 93. — DOI: 10.3390/geosciences7040093.

113. *Arvor, D.* Advances in Geographic Object-Based Image Analysis with ontologies: A review of main contributions and limitations from a remote sensing perspective / D. Arvor, L. Durieux, S. Andrés [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2013. — Vol. 82. — P. 125–137. — DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.05.003.

114. *Samoylov, A.* The ontology-based methodology for determining the objects' geometric parameters from pre-processed digital images for applied photogrammetry / A. Samoylov, N. Sergeev, I. Polovko, A. Voloshin // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology & Mining Ecology Management (SGEM)* : [proceedings], 16–25 August 2020, Albena, Bulgaria. — Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2020. — Vol. 2020, Issue 2.1. — P. 381–388. — DOI: 10.5593/sgem2020/2.1/s07.049.

115. *Голозубов, О. М.* Оптимизация вычислительной схемы интерполяции декадных метеорологических данных методом обратного взвешивания по расстоянию с параллельной обработкой множественных временных срезов / О. М. Голозубов, А. В. Козловский, Э. В. Мельник, Я. Э. Мельник, А. Н. Самойлов // *Известия ЮФУ. Технические науки.* — 2025. — № 6. (248) — С. 22–32. — DOI: 10.18522/2311-3103-2025-6-22-32.

116. *Kozlovskiy A.V.* Method of Reference Point Detection in Composite Image Formation Using Mobile Devices / Kozlovskiy A. V., Lishchenko E. V., Melnik E. V., Samoylov A. N. // *Lecture Notes in Networks and Systems.* – 2025. – Vol. 1490. – P. 384–396. – DOI 10.1007/978-3-031-96759-7_28.

117. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688216 Российская Федерация. Программный модуль формирования составных изображений на основе шаблона: № 2024686563: заявл. 07.11.2024: опубл. 26.11.2024 / Беспалов Д. А., Козловский А. В., Мельник Э. В; правообладатель(и) ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет».

118. *Kumawat, D.* ORB-SIFT Hybrid Feature Extraction: A Unified Feature Extraction Approach / D. Kumawat, D. Abhayankar, S. Tanwani // *Artificial Intelligence Based Smart and Secured Applications: proceedings of the 3rd International Conference on Advancements in Smart Computing and Information Security — ASCIS 2024; Rajkot, India, 16–18 October 2024 / edited by S. Rajagopal [et al.].* — Cham: Springer, 2025. — P. 109–120. — (Communications in Computer and Information Science; vol. 2424). — ISBN 978-3-031-86289-2. — DOI: 10.1007/978-3-031-86290-8_10.

119. *Isik, M.* Comprehensive empirical evaluation of feature extractors in computer vision / M. Isik // *PeerJ Comput. Sci.* — 2024. — Vol. 10, art. e2415. — ISSN 2376-5992. — DOI: 10.7717/peerj-cs.2415.
120. *Salam Al-jaberi, A.* Integrating Harris Corner Detector and SIFT Descriptor for High-Accuracy Feature Matching in Image Processing / A. Salam Al-jaberi, S. F. Rahman, I. F. Raheem // *Journal of Al-Qadisiyah for Computer Science and Mathematics.* — 2025. — Vol. 17, № 3. — P. Comp 179–190. — DOI: 10.29304/jqcs.2025.17.32455.
121. *Jiang, C.* Homography-Based PnP Solution to Reject Outliers / C. Jiang, Q. Hu, H. Li, D. Li // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* - 2022. - Vol. 71. - Art. no. TIM.2022. — DOI: 10.1109/TIM.2022.3216085.
122. *Zhang, B.* Spatial Transformation for Image Composition via Correspondence Learning / B. Zhang, Y. Liu, K. Lu [и др.] // *arXiv preprint.* — 2022. — Art. arXiv:2211.09386. — DOI: 10.48550/arXiv.2207.02398.
123. *Мельник, Э. В.* Применение мобильных устройств при решении задач прикладной фотограмметрии / Э. В. Мельник, А. Н. Самойлов, А. В. Козловский, В. И. Волощук // *Перспективные системы и задачи управления: сборник материалов XIX Всероссийской научно-практической конференции.* — 2024. — С. 459–461.
124. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689925 Российская Федерация. Программный модуль сшивки изображений с оптимизацией на основе отсечения контуров: № 2024689065 заявл. 28.11.2024, опубл. 11.12.2024 / Беспалов Д. А., Козловский А. В., Мельник Э. В.; правообладатель(и) ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет».
125. *Серра, Ж. П.* Анализ изображений и математическая морфология / Ж. П. Серра ; перевод с английского. — Лондон: Academic Press, 1982. — 638 с. — ISBN 0-12-637240-3.
126. *Ehrensperger, G.* Fast algorithms for morphological operations using run-length encoded binary images / G. Ehrensperger, A. Ostermann, F. Schwitzer / *arXiv.* - 2015. - Pp. 1–15.

127. *Дотерти, Э. Р.* Введение в морфологическую обработку изображений / Э. Р. Дотерти ; перевод с английского. — Беллингхэм : SPIE Optical Engineering Press, 1992. — 161 с. — ISBN 978-0-8194-0845-7. — (SPIE Tutorial Texts Series; vol. 9).

128. *Noyel, G.* Logarithmic Mathematical Morphology: A New Framework Adaptive to Illumination Changes / G. Noyel // Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications: proceedings of the 23rd Iberoamerican Congress on Pattern Recognition — CIARP 2018; Madrid, Spain, 1–4 November 2018 / edited by R. Vera-Rodriguez [et al.]. — Cham: Springer, 2019. — P. 576–584. — (Lecture Notes in Computer Science; vol. 11401). — DOI: 10.1007/978-3-030-13469-3_53.

129. *Huang, Y.* Simulation-Based Optimization of Path Planning for Camera-Equipped UAVs That Considers the Location and Time of Construction Activities / Y. Huang, A. Hammad // Remote Sensing. - 2024. - Vol. 16(13). - Art. 2445. — DOI: 10.3390/rs16132445.

130. *Lin, S.* A Review of Path-Planning Approaches for Multiple Mobile Robots / S. Lin, A. Liu, J. Wang, X. Kong // Machines. - 2022. - Vol. 10(9). - Art. 773. — DOI: 10.3390/machines10090773.

131. *Diab, M.* Artificial Potential Field-Based Path Planning for Cluttered Environments / M. Diab, M. Mohammadkarimi, R. Rajan // 2023 IEEE Aerospace Conference — AERO 2023; Big Sky, MT, USA, 4–11 March 2023. — Piscataway: IEEE, 2023. — P. 1–8. — DOI: 10.1109/AERO55745.2023.10115857.

132. *Phung, M. D.* Enhanced discrete particle swarm optimization path planning for UAV vision-based surface inspection / M. D. Phung [et al.] // arXiv. - 2017. — DOI: 10.1016/j.autcon.2017.04.013.

133. *Lavin, A.* A Pareto Optimal D* Search Algorithm for Multiobjective Path Planning / A. Lavin // arXiv. - 2015.

134. *Zhou, K. C.* Mesoscopic photogrammetry with an unstabilized phone camera / K. C. Zhou, C. Cooke, J. Park [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition — CVPR 2021; Nashville, TN, USA, 20–25

June 2021. — Piscataway: IEEE, 2021. — P. 7531–7541. — ISSN 1063-6919. — DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.00745.

135. *Muli, C.* A Comparative Study on Energy Consumption Models for Drones / C. Muli, S. Park, M. Liu // International Conference on Autonomous Systems, Dublin City University. - 2022. - P. 12–29. — DOI: 10.1007/978-3-031-20936-9_16.

136. *Góra, K.* Machine Learning in Creating Energy Consumption Model for UAV / K. Góra, P. Smyczyński, M. Kujawiński, G. Granosik // Energies. - 2022. - Vol. 15, No. 18. - Art. 6810. - P. 1–17. — DOI: 10.3390/en15186810.

137. *Traspadini, A.* On the Energy Consumption of UAV Edge Computing in Non-Terrestrial Networks / A. Traspadini, M. Giordani, G. Giambene, T. De Cola, M. Zorzi // 57th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. - 2023. - P. 1–7. — DOI: 10.1109/IEEECONF59524.2023.10476934.

138. *Mohamed, S. A. S.* Energy-Efficient Mobile Robot Control via Run-time Monitoring of Environmental Complexity and Computing Workload / S. A. S. Mohamed, M.-H. Haghbayan, A. Miele, O. Mutlu, J. Plosila // arXiv. - 2021. - Pp. 1–15. — DOI: 10.1109/IROS51168.2021.9635877.

139. *Svorenova, M.* Resource-Performance Trade-off Analysis for Mobile Robots /, M. Svorenova, M. Lahijanian, A. Morye [et al.] // IEEE Robot. Autom. Lett. — 2016. — Vol. 3, no. 3. — P. 1840–1847. — ISSN 2377-3766. — DOI: 10.1109/LRA.2018.2803814.

140. *Ramirez-Atencia, C.* A revision on Multi-Criteria Decision Making methods for Multi-UAV Mission Planning Support / C. Ramirez-Atencia, V. Rodriguez-Fernandez, D. Camacho // Expert Syst. Appl. — 2020. — Vol. 160, art. 113708. — ISSN 0957–4174. — DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113708.

141. *Datsko, D.* Energy-aware Multi-UAV Coverage Mission Planning with Optimal Speed of Flight / D. Datsko [et al.] // arXiv. - 2024. - Pp. 1–15. — DOI: 10.1109/LRA.2024.3358581.

142. *Adoni, W. Y. H.* Intelligent Swarm: Concept, Design and Validation of Self-Organized UAVs Based on Leader–Followers Paradigm for Autonomous Mission Planning / W. Y. H. Adoni, J. S. Fareedh, S. Lorenz [et al.] // *Drones*. - 2024. - Vol. 8(10). - Art. 575. - P. 1–15. – DOI:10.3390/drones8100575.

143. *Liu, Z.* Leader–follower UAVs formation control based on a deep Q-network collaborative framework / Z. Liu, J. Li, J. Shen [et al.] // *Scientific Reports*. - 2024. - Vol. 14. - Art. 4674. - P. 1–12. – DOI:10.1038/s41598-024-54531-w.

144. *Chen, Y.* Leader-Follower UAV formation flight control based on feature modelling / Y. Chen, T. Deng // *Syst. Sci. Control Eng.* — 2023. — Vol. 11, no. 1. — Art. 2268153. — ISSN 2164–2583. — DOI: 10.1080/21642583.2023.2268153.

145. *Zhao, T.* Optimal path selection algorithm for UAV formation guided by a UV virtual fence / T. Zhao, G. Zhang, H. Liang, K. Rong // *Applied Optics*. - 2022. - Vol. 61, № 12. - P. 3456–3467. – DOI: 10.1364/AO.453815. - PMID: 35471296.

146. *Chang, X.* Research on multi-UAV autonomous obstacle avoidance algorithm integrating improved dynamic window approach and ORCA / X. Chang, J. Wang, K. Li, X. Zhang, Q. Tang // *Scientific Reports*. - 2025. - Vol. 15, № 1. - P. 12345. – DOI: 10.1038/s41598-025-99111-8. - PMID: 40287495. - PMCID: PMC12033278.

147. *Srivastava, A.* A Modified Artificial Potential Field for UAV Collision Avoidance / A. Srivastava, V. R. Vasudevan, H. Dalal [et al.] // 2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS); Warsaw, Poland, 6–9 June 2023. — Piscataway: IEEE, 2023. — P. 499–506. — ISBN 979-8-3503-3392-2. — DOI: 10.1109/ICUAS57906.2023.10156492.

148. *Min, H.* Kinematic and Dynamic Vehicle Model-Assisted Global Positioning Method for Autonomous Vehicles with Low-Cost GPS /Camera/In-Vehicle Sensors / H. Min, X. Wu, C. Cheng, X. Zhao // *Sensors*. — 2019. — Vol. 19, № 24. — Art. 5430. — DOI: 10.3390/s19245430.

149. *Kaplan, A.* Interpreting the Ratio Criterion for Matching SIFT Descriptors / A. Kaplan, T. Avraham, M. Lindenbaum // *Computer Vision — ECCV 2016: proceedings of the 14th European Conference on Computer Vision; Amsterdam, The Netherlands, 11–14 October 2016. Part III* / edited by B. Leibe [et al.]. — Cham: Springer, 2016. — P.

559–574. — (Lecture Notes in Computer Science; vol. 9909). — ISBN 978-3-319-46453-4. — DOI: 10.1007/978-3-319-46454-1_42.

150. *Zhang, Z.* A Flexible New Technique for Camera Calibration / Z. Zhang // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. - 2000. — DOI: 10.1109/34.888718.

151. *Mikolajczyk, K.* A Performance Evaluation of Local Descriptors / K. Mikolajczyk, C. Schmid // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. - 2005. — DOI: 10.1109/TPAMI.2005.188.

152. *Gonzalez, R.C.* Digital Image Processing / R. C. Gonzalez, R. E. Woods. — 4th ed. — New York: Pearson, 2018. — 1168 p. — ISBN 978-0-13335-672-4.

153. *Vijay Kumar Gowda, B. N. V.* Correction of radial distortion for fish eye lens camera model using code / B. N. Vijay Kumar Gowda [et al.] // *J. Phys.: Conf. Ser.* - 2022. - Vol. 2335. - Art. 012027. — DOI: 10.1088/1742-6596/2335/1/012027.

154. *Тёрк, М.* Компьютерное зрение. Передовые методы и глубокое обучение / М. Тёрк, Р. Дэвис; перевод с английского. — Москва: ДМК Пресс, 2022. — 448 с. — ISBN 978-5-93700-148-1.

155. *Brown, M.* Recognising Panoramas / M. Brown, D. G. Lowe // *Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision — ICCV 2003; Nice, France, 13–16 October 2003*. — Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2003. — Vol. 2. — P. 1218. — ISBN 0-7695-1950-4. — DOI: 10.1109/ICCV.2003.1238630.

156. *Forsyth, D. A.* Computer Vision: A Modern Approach / D. A. Forsyth, J. Ponce. - *Pearson*, 2011.

157. *Waga, A.* A survey on autonomous navigation for mobile robots: From traditional techniques to deep learning and large language models / A. Waga, S. Benhlila, A. Bekri [et al.] // *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.* — 2025. — Vol. 37, art. 198. — ISSN 1319–1578. — DOI: 10.1007/s44443-025–00216-x.

158. *Zhu, W.* Real-time object detection for unmanned aerial vehicles based on vision transformer and edge computing / W. Zhu, K. Chen // *Scientific Reports*. — 2026. — Vol. 16. — Art. 6814. — DOI: 10.1038/s41598-026-37938-5.

159. *Liu, Y.* MMFW-UAV dataset: multi-sensor and multi-view fixed-wing UAV dataset for air-to-air vision tasks / Y. Liu, Z. Sun, L. Xi [et al.] // *Sci. Data.* — 2025. — Vol. 12, art. 185. — ISSN 2052-4463. — DOI: 10.1038/s41597-025-04482-2.
160. *Faugeras, O. D.* Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint / O. D. Faugeras. - *MIT Press*, 1993.
161. *Canny, J.* A Computational Approach to Edge Detection / J. Canny // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* — 1986. — Vol. PAMI-8, no. 6. — P. 679–698. — ISSN 0162-8828. — DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
162. *Chan, T. F.* Image Processing and Analysis: Variational, PDE, Wavelet, and Stochastic Methods / T. F. Chan, J. Shen. - *Society for Industrial and Applied Mathematics.* — *Philadelphia: SIAM*, 2005. — 421 p. — ISBN 978-0-89871-589-7.
163. *Козловский, А. В.* Организация распределённой обработки информации при формировании составных изображений // Сборник научных трудов XII Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». - 2024. - С. 197–200.
164. *Козловский, А. В.* Распараллеливание обработки информации при формировании составных изображений // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2025. – № 1. (243) – С. 92–103. — DOI: 10.18522/2311-3103-2025-1-92-103.
165. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689469 Российская Федерация. Программный модуль для пошаговой обработки тайлов изображений большого размера с оптимизацией загрузки CPU: № 2024688197: заявл. 25.11.2024: опубл. 06.12.2024 / Беспалов Д. А., Козловский А. В., Мельник Э. В; правообладатель(и) ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет».
166. *Козловский, А. В.* Исследование эффективности алгоритмов обработки информации при формировании изображений группой мобильных объектов / А. В. Козловский, Э. В. Мельник // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* – 2025. – Т. 13, № 4. (51) – С. 1–12. – DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.031.

167. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687855 Российская Федерация. Прототип программных средств организации распределённых вычислений при мультиспектральной обработке данных: № 2024686461: заявл. 07.11.2024: опубл. 21.11.2024 / Таранов А. Ю., Козловский А. В., Мельник Э. В., Сафроненкова И. Б., Пуха И. С.; правообладатель(и) ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет».

168. *Самойлов, А. Н.* Алгоритмическое обеспечение системы интеллектуальной обработки цифровых изображений для задач прикладной фотограмметрии / А. Н. Самойлов, А. В. Волошин, А. В. Козловский // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. - 2019. – № 3 (246). – С. 96–102.

169. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688443 Российская Федерация. Библиотека алгоритмов для построения систем прикладной фотограмметрии на основе мобильных компонентов: № 2024686462: заявл. 07.11.2024: опубл. 27.11.2024 / Козловский А. В., Волощук В. И., Мельник Я. Э; правообладатель(и) ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет».

170. *Rafiq, A.* Enhancing Collaborative AI Learning: A Blockchain-Secured, Edge-Enabled Platform for Multimodal Education in IIoT Environments / A. Rafiq, E. Melnik, A. Samoylov [et al.] // *Big Data Cogn. Comput.* - 2026. - Vol. 10, No. 4 (10). - P. 123. – DOI: 10.3390/bdcc10040123.

171. Патент на полезную модель № 238387 U1 Российская Федерация, МПК G06F 15/163, G06V 10/82. Бортовой многоцелевой реконфигурируемый вычислитель: № 2025121313 : заявл. 01.08.2025 : опубл. 28.10.2025 / О. Б. Спиридонов, Э. В. Мельник, А. Н. Самойлов [и др.] ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»

172. *Ktari, M.* Electing a Leader in Dynamic Networks using Mobile Agents and Local Computations / M. Ktari, M. Mosbah, A. Hadj Kacem // *Procedia Computer Science.* – 2017. – Vol. 109. – P. 351–358. – DOI: 10.1016/j.procs.2017.05.363.

173. *Takayanagi, I.* HDR CMOS Image Sensors for Automotive Applications / I. Takayanagi, R. Kuroda // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 2022. — Vol. 69, № 5. — P. 2815–2823. – DOI: 10.1109/TED.2022.3164370.
174. *Szeliski, R.* Computer Vision: Algorithms and Applications / R. Szeliski. — 2nd ed. — Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. — XXII, 925 p. — ISBN 978-3-030-34371-2.
175. *Jimenez-Romero, C.* Multi-agent systems powered by large language models: applications in swarm intelligence / C. Jimenez-Romero, A. Yegenoglu, C. Blum // *Frontiers in Artificial Intelligence*. — 2025. — Vol. 8. — Article 1593017. – DOI: 10.3389/frai.2025.1593017.
176. *Dosselmann, R.* A comprehensive assessment of the structural similarity index / R. Dosselmann, X. D. Yang // *Signal Process.: Image Commun.* — 2011. — Vol. 5, no. 1. — P. 81–91. – DOI: 10.1007/s11760-009-0144-1.
177. *Horé, A.* Image quality metrics: PSNR vs. SSIM / A. Horé, D. Ziou // *Proceedings of the 20th International Conference on Pattern Recognition: ICPR 2010; Istanbul, Turkey, 23–26 August 2010*. — Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2010. — P. 2366–2369. — DOI: 10.1109/ICPR.2010.579.
178. *Ma, S.* Research on Image Stitching Algorithm Based on Point-Line Consistency and Local Edge Feature Constraint / Ma, S., Li, X. [et al.] // *Entropy*. — 2024. — Vol. 26, no. 1. — P. 61. — DOI: 10.3390/e26010061.
179. *Zhang, C.* Image Stitching Based on Color Difference and KAZE with a Fast Guided Filter / C. Zhang, D. Wang, H. Sun // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23, no. 10. — P. 4583. — DOI: 10.3390/s23104583.
180. *Gao, J.* Seam-Driven Image Stitching / J. Gao, Y. Li, T.-J. Chin, M. S. Brown // *Eurographics (Short Papers)*. — 2013. — P. 45–48.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты о внедрении результатов работы

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора научно-исследовательского института
многопроцессорных вычислительных систем им.
академика А.В. Каляева Южного федерального
университета (НИИ МВС ЮФУ)
доктор технических наук



А.И. Дордопуло

« 03 » 09 2026 г.

М.П.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Козловского Александра Вячеславовича

**«Метод, методика и алгоритм организации обработки информации при решении задач
прикладной фотограмметрии на базе мобильных объектов»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Комиссия в составе: Д.Я. Иванова – к.т.н., и.о. заведующего лабораторией НИИ МВС ЮФУ, А.А. Дьяченко – научного сотрудника НИИ МВС ЮФУ, Р.Н. Кулиничева – программиста второй категории НИИ МВС ЮФУ, настоящим актом подтверждает, что в НИИ МВС ЮФУ внедрены и используются следующие научные результаты диссертационной работы А.В. Козловского: метод и реализующий его алгоритм обработки информации при формировании изображений высокого разрешения с использованием опорного шаблона низкого разрешения и двухэтапной процедуры совмещения частично перекрывающихся фрагментов, включающей глобальную регистрацию по ключевым точкам и последующее локальное уточнение взаимного положения фрагментов по контурам в областях перекрытия.

Результаты диссертационной работы А.В. Козловского используются в НИИ МВС ЮФУ при выполнении работы ГЗ0110/25-07-МВС (проект «Тема 23.6»).

Внедрение и использование полученных результатов позволило в два раза снизить аппаратные требования к устройствам получения и обработки данных для формирования изображений высокого разрешения по сравнению с аналогами за счет совмещения фрагментов целевого изображения, полученных из разных снимков на основе совмещения ключевых точек и анализа контуров.

И.о. заведующего лабораторией
НИИ МВС ЮФУ, к.т.н.,

Иванов -

Д.Я. Иванов

Научный сотрудник
НИИ МВС ЮФУ,

Дьяченко

А.А. Дьяченко

Программист второй категории
НИИ МВС ЮФУ

Кулиничев

Р.Н. Кулиничев

УТВЕРЖДАЮ

Директор Академии
биологии и медицины
им. Дмитрия Иосифовича Ивановского
Южного федерального университета
доктор географических наук

« 05 » 02 2026 г. К. И. Казеев

М.П.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
Козловского Александра Вячеславовича
«Метод, методика и алгоритм организации обработки информации при решении задач
прикладной фотограмметрии на базе мобильных объектов»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Комиссия в составе: С. Танвара – PhD, заведующего научной лабораторией «Исследовательская лаборатория искусственных почвенных технологий и цифровых решений», руководителя проекта РНФ №25–76–31013 «Разработка и реализация методологии создания цифрового двойника почв на основе искусственного интеллекта и технологии Big Data», Сушковой С. Н. – д.б.н., заведующей научной лабораторией «Центр воспроизводства плодородия почв», Ю. А. Литвинова – к.б.н., ведущего научного сотрудника научной лаборатории «Исследовательская лаборатория искусственных почвенных технологий и цифровых решений» настоящим актом подтверждает, что при выполнении НИР №25–76–31013 «Разработка и реализация методологии создания цифрового двойника почв на основе искусственного интеллекта и технологии Big Data», реализуемой на базе Академии биологии и медицины им. Д. И. Ивановского внедрены и использованы следующие теоретические положения диссертационной работы А. В. Козловского:

- метод обработки информации при формировании изображений высокого разрешения с использованием мобильного объекта;
- методика организации обработки информации при формировании изображений высокого разрешения группами мобильных объектов.

Использование полученных результатов позволило:

- снизить аппаратные требования к отдельному устройству в части камеры при формировании изображений заданного разрешения в 2 раза;

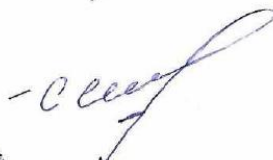
- снизить временные затраты на формирование изображения до 10 раз, в случае распараллеливания процесса.

Заведующий научной лабораторией
PhD



С. Танвар

Заведующая научной лабораторией
д.б.н.



С. Н. Сушкова

Ведущий научный сотрудник
к.б.н.



Ю. А. Литвинов

УТВЕРЖДАЮ

Директор – главный конструктор
конструкторского бюро
Научно-конструкторского бюро
моделирующих и управляющих систем
Южного федерального университета
кандидат технических наук

« 04 » 29 2026 г.

М.П.



АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
Козловского Александра Вячеславовича
«Метод, методика и алгоритм организации обработки информации при решении задач
прикладной фотограмметрии на базе мобильных объектов»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Комиссия в составе: О. Б. Спиридонова – к.т.н., директора – главного конструктора конструкторского бюро НКБ «МИУС» ЮФУ, И.Ф. Сурженко – к.т.н., главного конструктора проекта конструкторского бюро НКБ «МИУС» ЮФУ, Зорина Р.Л. – ведущего инженера-конструктора конструкторского бюро НКБ «МИУС» ЮФУ настоящим актом подтверждает, что в НКБ «МИУС» ЮФУ внедрены и используются следующие теоретические и практические положения диссертационной работы А.В. Козловского:

- метод обработки информации при формировании изображений высокого разрешения с использованием мобильного объекта;
- методика организации обработки информации при формировании изображений высокого разрешения группами мобильных объектов;
- алгоритм работы мобильного объекта при формировании изображений высокого разрешения в группе;
- программная модель, реализующая указанные выше метод, методику и алгоритм.

Результаты диссертационной работы А.В. Козловского использованы в НКБ «МИУС» ЮФУ при выполнении НИОКР «Создание технологии построения микроминиатюрной вычислительной платформы авионики для малоразмерных БЛА» в рамках реализации Фондом поддержки проектов национальной технологической инициативы Федерального проекта «Перспективные технологии для беспилотных авиационных систем» национального проекта

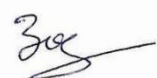
«Беспилотные авиационные системы» государственной программы Российской Федерации (субсидия федерального бюджета № 70–2024–001125 от 20.09.2024 г.).

Использование полученных результатов позволило:

- снизить аппаратные требования к отдельному устройству в части камеры при формировании изображений заданного разрешения в 2 раза;
- снизить временные затраты на формирование изображения до 6 раз, в случае распараллеливания процесса;
- обеспечить формирование изображения высокого разрешения динамичных сцен;
- практически реализовать метод и методику в условиях согласованной групповой работы мобильных объектов.

Директор – главный конструктор
конструкторского бюро, к.т.н.





О.Б. Спиридонов

Главный конструктор проекта, к.т.н.

И.Ф. Сурженко

Ведущий инженер-конструктор

Р.Л. Зорин

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
деятельности и информационным
технологиям

ФГАОУ ВО «Южный федеральный
университет» (ЮФУ)

кафедра физико-математических
наук, доцент



П. В. Махно

02 2026 г.

АКТ

**об использовании в учебном процессе кафедры вычислительной техники результатов,
полученных в диссертации Козловского Александра Вячеславовича на тему
«Метод, методика и алгоритм организации обработки информации при решении задач
прикладной фотограмметрии на базе мобильных объектов»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Комиссия в составе: А.Е. Лызь – к.т.н., зам. директора Института компьютерных технологий и информационной безопасности (ИКТИБ) ЮФУ, А.Н. Самойлова – к.т.н., заведующего кафедрой вычислительной техники (ВТ) ИКТИБ ЮФУ, М.Ю. Поленова – к.т.н., доцента кафедры ВТ, руководителя основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) «Высокопроизводительные вычислительные системы и квантовая обработка информации» подготовки студентов по направлению 09.04.01 Информатика и вычислительная техника, А.О. Пьявченко – к.т.н., доцента кафедры ВТ, руководителя ОПОП подготовки студентов по специальности 09.05.01 Применение и эксплуатация автоматизированных систем специального назначения (программа подготовки «Автоматизированные системы обработки информации и управления») настоящим актом подтверждает, что теоретические и практические результаты диссертационной работы Козловского Александра Вячеславовича используются в учебном процессе для формирования профессиональных компетенций обучающихся ЮФУ в части:

- 1) обработки информации при формировании изображений высокого разрешения;
- 2) организации распределенных вычислений в группах мобильных объектов;
- 3) распараллеливания обработки информации в группах мобильных объектов;
- 4) разработки средств моделирования для исследования процессов обработки информации в системах прикладной фотограмметрии и компьютерного зрения.

Перечисленные результаты используются в учебном процессе подготовки студентов при проведении лекционных и лабораторных занятий, а также при руководстве выпускными квалификационными работами (ВКР):

- по направлению 09.04.01 Информатика и вычислительная техника программы подготовки «Высокопроизводительные вычислительные системы и квантовая обработка информации» в рамках дисциплин «Инструментальные средства разработки геоинформационных систем» и «Программное и аппаратное обеспечение информационных систем»;
- по специальности 09.05.01 Применение и эксплуатация автоматизированных систем специального назначения программы подготовки «Автоматизированные системы обработки информации и управления» в рамках дисциплин «Основы автоматизированных систем управления и обработки информации» и «Специальное программное обеспечение реального времени»;
- по направлению 09.03.01 Информатика и вычислительная техника программы подготовки «Технологии искусственного интеллекта» по дисциплинам «Компьютерное зрение» и «Компьютерные сети».

Зам. директора
ИКТИБ ЮФУ, к.т.н.

А.Е. Лызь

Заведующий кафедрой ВТ
ИКТИБ ЮФУ, к.т.н.

А. Н. Самойлов

Руководитель ОПОП 2026 года набора
«Высокопроизводительные вычислительные системы
и квантовая обработка информации»
(напр. 09.04.01 Информатика
и вычислительная техника,
доцент кафедры ВТ ИКТИБ ЮФУ, к.т.н.

М. Ю. Поленов

Руководитель ОПОП 2026 года набора
«Автоматизированные системы обработки
информации и управления»
(спец. 09.05.01 Применение и эксплуатация
автоматизированных систем
специального назначения),
доцент кафедры ВТ ИКТИБ ЮФУ, к.т.н.

А.О. Пьявченко

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024689469

**Программный модуль для пошаговой обработки тайлов
изображений большого размера с оптимизацией
загрузки CPU**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет» (RU)*

Авторы: *Беспалов Дмитрий Анатольевич (RU), Козловский
Александр Вячеславович (RU), Мельник Эдуард
Всеволодович (RU)*



Заявка № 2024688197

Дата поступления 25 ноября 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 декабря 2024 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e7c1a6300b15442401670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024688216

Программный модуль формирования составных
изображений на основе шаблонаПравообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет» (RU)*Авторы: *Беспалов Дмитрий Анатольевич (RU), Козловский
Александр Вячеславович (RU), Мельник Эдуард
Всеволодович (RU)*

Заявка № 2024686563

Дата поступления 07 ноября 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 ноября 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственностиДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e761a6300b1b5442401670bca2026
Владелец: **Зубов Юлий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024688443

**Библиотека алгоритмов для построения систем
прикладной фотограмметрии на основе мобильных
компонентов**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет» (RU)*

Авторы: *Козловский Александр Вячеславович (RU), Волощук
Вадим Игоревич (RU), Мельник Ярослав Эдуардович (RU)*

Заявка № **2024686462**

Дата поступления **07 ноября 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **27 ноября 2024 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e701af3006f544240f670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024666026

**Онтологическая модель для автоматизированного
пополнения данных для синтеза систем прикладной
фотограмметрии**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет» (RU)*

Авторы: *Козловский Александр Вячеславович (RU), Волощук
Вадим Игоревич (RU)*



Заявка № 2024664694

Дата поступления 28 июня 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 июля 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 429b6a0fe3853164ba196183b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024687855

**Прототип программных средств организации
распределенных вычислений при мультиспектральной
обработке данных**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «Южный
федеральный университет» (RU)*

Авторы: *Таранов Антон Юрьевич (RU), Козловский Александр
Вячеславович (RU), Мельник Эдуард Всеволодович (RU),
Сафроненкова Ирина Борисовна (RU), Пуха Иван Сергеевич
(RU)*



Заявка № 2024686461

Дата поступления 07 ноября 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 21 ноября 2024 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e7c1a6300b15442401670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024689925

**Программный модуль сшивки изображений с
оптимизацией на основе отсечения контуров**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет» (RU)*

Авторы: *Беспалов Дмитрий Анатольевич (RU), Козловский
Александр Вячеславович (RU), Мельник Эдуард
Всеволодович (RU)*



Заявка № **2024689065**

Дата поступления **28 ноября 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **11 декабря 2024 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e761a6300b5442401670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 238387

Бортовой многоцелевой реконфигурируемый
вычислитель

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет" (RU)*

Авторы: *Спиридонов Олег Борисович (RU), Мельник Эдуард Всеволодович (RU), Самойлов Алексей Николаевич (RU), Остроухов Андрей Юрьевич (RU), Козловский Александр Вячеславович (RU)*

Заявка № 2025121313

Приоритет полезной модели 01 августа 2025 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 28 октября 2025 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 01 августа 2035 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7ad18d531b4b8818e75f29506
Владелец *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

