

На правах рукописи



УШЕНКИН Виктор Андреевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ОТ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО
И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Рязань 2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» (РГРТУ)
в НИИ обработки аэрокосмических изображений (НИИ «Фотон» РГРТУ)

Научный консультант: **Гусев Сергей Игоревич**
доктор технических наук,
проректор по научной работе и инновациям,
заведующий кафедрой «Космические технологии»
РГРТУ

Официальные оппоненты: **Ермаков Дмитрий Михайлович**
доктор физико-математических наук,
заведующий отделом «Исследования Земли из кос-
моса» ФГБУН Институт космических исследова-
ний Российской академии наук, г. Москва

Костров Виктор Васильевич
доктор технических наук,
профессор кафедры радиотехники Муромского
института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский
государственный университет имени Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича Столето-
вых», г. Муром Владимирской обл.

Сергеев Владислав Викторович
доктор технических наук,
профессор кафедры геоинформатики и информа-
ционной безопасности ФГАОУ ВО «Самарский на-
циональный исследовательский университет име-
ни академика С.П. Королева», г. Самара

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский
университет)», г. Москва**

Защита состоится **20 мая 2026 года в 12:00** на заседании
диссертационного совета 24.2.375.01 в РГРТУ по адресу:
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ и на сайте
РГРТУ: <http://www.rsreu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 202_ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.375.01,
доктор технических наук

 **Пруцков
Александр Викторович**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Создание космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в видимом и радиодиапазонах спектра определено Федеральными космическими программами и Гособоронзаказами России как приоритетное направление оперативного получения объективной информации по наблюдаемым объектам природного и антропогенного происхождения.

В данном стратегически важном для России направлении космической деятельности центральное место отводится созданию передовых бортовых средств получения данных от оптико-электронных и радиолокационных систем ДЗЗ и наземных комплексов их приема и обработки. Системный анализ этих двух классов систем ДЗЗ показывает, что процессы получения и обработки оптических и радиолокационных изображений имеют много общего, но и ряд принципиальных различий. *Общность* процессов проявляется в сходстве бортовой навигационной и другой командно-измерительной аппаратуры, а также в очень схожих принципах наземной обработки и формирования информационных продуктов. *Различия* технологий получения и обработки оптической и радиолокационной информации обусловлены прежде всего принципиально разными физическими принципами формирования данных в оптико-электронных и радиолокационных системах ДЗЗ.

В то же время каждый из видов систем ДЗЗ имеет свои преимущества и ограничения.

Оптико-электронные системы формируют изображения объектов земной поверхности, привычные для человека и не искаженные мультипликативным шумом, как это происходит в радиолокации из-за когерентного характера сигнала. Кроме того, они могут вести съемку в надир без геометрических искажений высотных объектов и загромождения одних объектов другими, что особенно важно при наблюдении горной местности и городской застройки.

Радиолокационные системы могут вести съемку независимо от погодных условий (в том числе при наличии облачности) и времени суток, имеют возможность регистрировать не только интенсивность, но также фазу и поляризацию электромагнитного излучения и за счет более высокой проникающей способности радиоволн позволяют наблюдать земную поверхность, скрытую лесными массивами, или объекты, размещенные в укрытиях, непрозрачных в видимом диапазоне. Кроме того, на точность геодезической привязки изображений, сформированных радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны, слабее влияют погрешности измерения угловой ориентации космического аппарата (КА).

Сопоставляя выявленные преимущества проанализированных систем ДЗЗ, можно сделать вывод, что оптико-электронные и радиолокационные системы дополняют друг друга. Совместное использование радиолокационных и оптико-электронных данных позволяет объединить их преимущества и парировать недостатки. Это подтверждается запуском КА ДЗЗ, на которых одновременно установлены и оптико-электронная, и радиолокационная съемочные аппарату-

ры: например, японского аппарата «ALOS-1» и российских аппаратов серии «Метеор-М».

Таким образом, возникает актуальная задача совместной обработки информации от обоих видов космических систем. Под *совместной обработкой* понимается обработка информации, сформированной космическими системами радиолокационного наблюдения Земли, с привлечением изображений и производных продуктов космических систем оптико-электронного наблюдения. Такая постановка рассматриваемой проблемы нацелена на расширение функциональных возможностей и повышение радиометрического и геометрического качества информационных продуктов, получаемых при наземной обработке. Решению указанной актуальной задачи посвящена настоящая диссертационная работа.

При этом вопросы создания оптико-электронной и радиолокационной съемочной аппаратуры в диссертации не рассматриваются, акцент делается на обработке информации, сформированной различными видами космических систем ДЗЗ.

В диссертации предлагаются новые научно обоснованные технические решения в виде методов и алгоритмов совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Охватываются все основные этапы обработки информации, начиная с бортового сжатия, продолжая первичной и стандартной наземными обработками и заканчивая высокоуровневой и тематической наземными обработками в части формирования цифровых моделей высот и объединения различных видов информации. Предлагаемые решения нацелены на повышение эффективности использования материалов космической съемки Земли на федеральном, региональном и отраслевом уровнях.

Степень разработанности темы. В настоящее время в мире создано и проектируется множество космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Методы и алгоритмы бортовой и наземной обработок во многом определяют основные тактико-технические характеристики выходных информационных продуктов таких систем.

В России созданием космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли и их составных частей занимаются следующие предприятия ракетно-космической отрасли:

– Ракетно-космический центр «Прогресс» (высокодетальные оптико-электронные системы «Ресурс-ДК, П, ПМ», «Аист-2Д, 2Т», системы специального назначения, радиолокационные системы серии «Обзор-Р»);

– Корпорация «ВНИИЭМ» (высокодетальные оптико-электронные системы в интересах Союзного государства, гидрометеорологические системы оптико-электронного и радиолокационного наблюдения серии «Метеор-М»);

– НПО имени С.А. Лавочкина (системы глобального оптико-электронного наблюдения серий «Электро-Л», «Электро-М», «Арктика-М», малые оптико-электронные и радиолокационные КА ДЗЗ серий «Беркут» и «Беркут-РСА»);

– НПО машиностроения (радиолокационные системы серии «Кондор»);

- Центральный НИИ машиностроения (проект «Сфера», малые оптико-электронные КА ДЗЗ серии «Грифон» и др.);
- Корпорация «Российские космические системы», включая Научный центр оперативного мониторинга Земли, (разработка целевой аппаратуры, радиолиний и средств наземной обработки информации для КА ДЗЗ, эксплуатация КА ДЗЗ);
- Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева (системы наблюдения с международной космической станции);
- НИИ точных приборов (разработка радиолокационной целевой аппаратуры для КА серий «Метеор-М» и «Обзор-Р», радиолиний и наземной инфраструктуры обработки информации для КА ДЗЗ);
- Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи (разработка радиолокационной целевой аппаратуры для КА серии «Метеор-М» и радиолиний для КА ДЗЗ);
- Концерн радиостроения «Вега» и НПП «Пульсар» (разработка радиолокационной целевой аппаратуры);
- НПП «ОПТЭКС», НПО «Лептон», ЛОМО, Красногорский завод имени С.А. Зверева (разработка оптико-электронной целевой аппаратуры).

Кроме того, вопросами обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли занимаются коллективы Института космических исследований РАН, Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, Института систем обработки изображений – Самара (в структуре Курчатовского института), фирмы «Ракурс», АО «АЭРОКОН», Ижевского радиозавода, концерна «Алмаз-Антей», НИЦ космической гидрометеорологии «Планета», Госцентра «Природа», Государственного космического научно-производственного центра имени М.В. Хруничева и его филиала НИИ космических систем имени А.А. Максимова, Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, МГУ, МФТИ, МГТУ имени Н.Э. Баумана, МАИ, НГУ, ЮЗГУ, УлГТУ, Муромского института ВлГУ имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, ПГУТИ, СамГТУ, РГРТУ, различных ведомственных организаций и др.

За рубежом созданием систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли и обработкой информации в таких системах занимаются космические агентства США (NASA), Канады (CSA), Евросоюза (ESA), Франции (CNES), Германии (DLR), Италии (ISA), Японии (JAXA), Китайской Народной Республики (CNSA), Республики Корея (KARI), Индии (ISRO) и других государств, научно-образовательные организации (Калифорнийский университет в Сан-Диего, США; Делфтский технический университет, Нидерланды и др.), а также частные фирмы и корпорации: Lockheed Martin, Maxar Technologies, Ball Aerospace & Technologies, NV5 Geospatial Software (США), Airbus Defence & Space, Spot Image (Евросоюз), ICEYE (Финляндия), Sarmap SA, GAMMA Remote Sensing (Швейцария), PCI Geomatics (Канада), ОАО «Пеленг» (Беларусь) и др.

Работы отечественных и зарубежных ученых и специалистов профильных организаций служат базой для исследований в рамках настоящей диссертационной работы.

Цель диссертации состоит в улучшении радиометрического и геометрического качества и увеличении скорости формирования информационных продуктов космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли за счет совместной обработки информации от таких систем.

Задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели:

- системный анализ проблемы совместной обработки информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ и выбор перспективных направлений совершенствования методическо-алгоритмической базы такой обработки;
- создание алгоритмов бортового сжатия радиоголограмм и оптических изображений с уменьшенными потерями;
- разработка методов уточнения угловой ориентации радиолокационного космического аппарата, измеренной оптико-электронными приборами, на основе амплитудного анализа формируемых радиолокационных изображений;
- создание вычислительно эффективных алгоритмов геодезической привязки и геометрической обработки радиолокационной информации на основе ее совмещения с опорными оптическими изображениями;
- разработка метода объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты в условиях низкой детальности опорной высотной информации от оптико-электронных космических систем ДЗЗ;
- создание метода высокоточной обработки интерферометрических изображений с целью получения цифровых моделей высот с привлечением низкодетальной высотной информации от оптико-электронных космических систем ДЗЗ;
- разработка вычислительно эффективного алгоритма нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных интерферограммах;
- создание алгоритмов объединения разнородной информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ;
- проведение экспериментальных исследований с целью подтверждения эффективности разработанных методов и алгоритмов.

Научная новизна диссертационной работы определяется тем, что в ней предложены и исследованы новые методы и алгоритмы совместной обработки информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ, позволяющие улучшить радиометрическое и геометрическое качество и увеличить скорость формирования информационных продуктов таких систем.

Конкретно на защиту выносятся следующие новые научные положения и результаты.

1. Алгоритмы бортового сжатия радиоголограмм и оптических изображений земной поверхности с потерями на основе блочно-адаптивного квантования и энтропийного кодирования (для радиоголограмм) и нейросетевых моделей (для оптических изображений), позволяющие при заданной степени сжатия уменьшить уровень искажений до 5% по сравнению с известными детерминированными алгоритмами.

2. Методы уточнения угловой ориентации космического аппарата с совместным использованием измерений оптико-электронных приборов и результатов амплитудного анализа радиолокационных изображений, позволяющие оценить угол крена со среднеквадратической ошибкой 1,5' и на 28 % сократить временные затраты на уточнение углов рысканья и тангажа.

3. Алгоритмы геодезической привязки и геометрической обработки радиолокационной информации на основе ее совмещения с опорными оптическими изображениями, позволяющие повысить точность оценки координат объектов в среднем до 4 м и значительно сократить время формирования стандартных информационных продуктов.

4. Метод объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики и использования низкодетальной высотной информации от оптико-электронных систем, позволяющий в среднем в 6 раз уменьшить площадь геометрических искажений без образования ложных границ.

5. Метод высокоточной обработки интерферометрических изображений с целью получения цифровых моделей высот на основе анализа сюжета интерферометрического изображения и привлечения низкодетальной высотной информации от оптико-электронных систем наблюдения Земли, позволяющий в среднем в 10 раз уменьшить среднеквадратическую ошибку определения высот по сравнению с лучшими зарубежными аналогами.

6. Алгоритм высокоскоростной нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных интерферограммах, позволяющий примерно в 22 раза сократить объем вычислений по сравнению с известной архитектурой «U-Net» при сохранении высокой точности сегментации.

7. Алгоритмы объединения разнородной информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли, позволяющие примерно на 3 % уменьшить среднеквадратическую ошибку измерения высоты по сравнению с лучшей из объединяемых цифровых моделей местности, примерно на 10 % снизить потери информативности объединяемых изображений и представить радиолокационные изображения в естественных цветах.

Теоретическая и практическая значимость диссертации состоит в том, что в ней изложены новые научно обоснованные технические решения в виде методов и алгоритмов совместной обработки информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ и на этой основе созданы программные средства обработки спутниковой информации, получившие внедрение на практике, которое вносит значительный вклад в повышение эффективности использования спутниковых данных в России на федеральном, отраслевом и региональном уровнях.

Методы исследования. Теоретические результаты получены с использованием методов системного анализа, цифровой обработки сигналов, оптимизации, линейной алгебры, математической статистики, теории графов и искусственного интеллекта.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» в части:

- пункта 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»;
- пункта 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»;
- пункта 12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации».

Реализация и внедрение. Диссертационная работа включает результаты исследований, выполненных в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина (НИИ «Фотон» РГРТУ) в рамках ОКР по созданию космической системы ДЗЗ «Обзор-Р» № 1, предусмотренной Федеральными космическими программами на 2006–2015 и 2016–2025 годы, космической системы ДЗЗ «Обзор-Р» № 2, а также в рамках НИР «Нейроборт» по заказу АО «ЦНИИмаш» в интересах Роскосмоса и НИР «Интеграция-СГ» в интересах Союзного государства. Результаты диссертационной работы в виде программных комплексов получили внедрение на практике, что подтверждается Актами от ведущих предприятий ракетно-космической отрасли России, специализирующихся в области космических исследований Земли: Ракетно-космического центра «Прогресс», ЦНИИмаш, Корпорации «Российские космические системы», НИИ космических систем имени А.А. Максимова – филиала ГКНПЦ им. М.В. Хруничева.

Результаты выполненных исследований опубликованы в учебных пособиях и использованы также в учебном процессе РГРТУ.

Акты приведены в приложении к диссертации.

Апробация работы. По основным положениям и результатам исследований диссертации сделаны доклады:

- на международных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, 2014), «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зонди-

рования Земли» (Москва, 2016, 2017, 2025), «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань, 2017, 2023), «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2015), «Математические методы в технике и технологиях» (Рязань, 2015), «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2016, 2017, 2021, 2022, 2024, 2025), «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2025), международном семинаре по современным материалам и технологиям в авиационной промышленности СМТАИ (Москва, 2016);

– на всероссийских конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2014–2017), «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (Самара, 2015, 2017, 2024), «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2014–2017, 2021–2023, 2025), «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2021).

Достоверность полученных результатов подтверждена корректным использованием математического аппарата, математическим и имитационным моделированием, экспериментальными исследованиями, сопоставлением с альтернативными подходами и практическим внедрением спроектированных комплексов обработки информации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 100 работ, в том числе 25 статей (23 в журналах по списку ВАК, также включенных в Белый список); 2 коллективные монографии; 1 патент на изобретение; 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ; 2 учебных пособия; 65 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и приложения. Ее объем составляет 403 с., в том числе 355 с. основного текста, 18 таблиц, 68 рисунков, 39 с. списка литературы из 330 наименований, 9 с. приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Анализ проблемы совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли

В главе 1 сопоставлены технологические схемы обработки целевой информации в космических системах радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Выполнен анализ существующих методов и алгоритмов бортовой обработки радиолокационной и оптической информации. Проанализированы известные методы и алгоритмы первичной, стандартной, высокоуровневой и тематической наземных обработок данных ДЗЗ. Выполнен анализ известных алгоритмов совместной обработки радиолокационной и оптической информации. В результате анализа определена актуальность проведения новых научных исследований по следующим направлениям.

Первое направление. Размещение радиолокационной и оптико-электронной съемочных аппаратур на одном КА ДЗЗ увеличивает объем целевой информации, подлежащей передаче на Землю, при ограниченной пропускной способности радиолинии. Поэтому актуальны исследования по созданию новых алгоритмов бортового сжатия радиоголограмм и оптических изображений, отличающихся меньшим уровнем искажений информации при заданной степени сжатия. Теоретические исследования в данном направлении представлены в первых двух параграфах главы 2 диссертации.

Второе направление. Зарубежные технологии первичной наземной обработки радиолокационной информации в первую очередь ориентированы на высокую точность измерительной информации об орбитальном движении и угловой ориентации КА. Базовые методы и алгоритмы уточнения измерительной информации путем анализа радиолокационных данных разработаны, однако развиваются в основном применительно к авиационным системам. В то же время в условиях импортозамещения российский технологический уровень пока не обеспечивает необходимую стабильность точностных характеристик измерительной аппаратуры КА. В связи с этим необходимы исследования по развитию методов уточнения угловой ориентации КА, измеренной оптико-электронными приборами, при первичной обработке радиолокационной информации с учетом особенностей космических систем наблюдения. Теоретические исследования в данном направлении представлены в последних двух параграфах главы 2 диссертации.

Третье направление. С учетом указанных выше особенностей отечественной аппаратуры, а также в связи с отсутствием отечественного опорного растрового радиолокационного покрытия земной поверхности и наличием только оптического покрытия актуальны исследования по созданию новых алгоритмов уточнения геодезической привязки радиолокационных изображений по опорным оптическим снимкам. Поскольку геометрическая обработка, включающая геодезическую привязку, является основным видом наземной обработки, необходимы исследования по повышению ее скорости. Теоретические аспекты данного направления представлены в первых трех параграфах главы 3 диссертации.

Четвертое направление. Из-за отсутствия аналога надирной оптической съемки на радиолокационных изображениях всегда присутствуют дефекты, вызванные перепадами высот наблюдаемых объектов: сверхъяркие области переналожения радиосигналов и области радиотени. Известны алгоритмы, позволяющие уменьшить количество таких дефектов за счет объединения изображений, полученных с восходящего и нисходящего витков орбиты, однако они требуют наличия высокоточной и высокодетальной цифровой модели высот наблюдаемых объектов. В то же время в России отсутствует собственная высококачественная глобальная цифровая модель высот и в основном используются лишь низкодетальные стереофотограмметрические модели, сформированные зарубежными оптико-электронными системами ДЗЗ. Таким образом, актуальна разработка метода объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты в условиях низкой детальности опорной стерео-

фотограмметрической цифровой модели высот. Теоретические основы данного метода изложены в последнем параграфе главы 3 диссертации.

Пятое направление. Наличие фазы в радиолокационном сигнале позволяет измерять высоты объектов земной поверхности по двум изображениям одной местности, снятым с близких параллельных орбит, с помощью интерферометрической обработки. Однако на точность измерения высот влияет ряд негативных факторов. В то же время доступна опорная информация о высоте в виде низкодетальных глобальных моделей высот, сформированных зарубежными оптико-электронными системами, которую можно использовать для повышения точности интерферометрической обработки. Поэтому необходима разработка подхода к интерферометрической обработке, учитывающего низкодетальную опорную информацию на всем тракте преобразования пары радиолокационных изображений в цифровую модель высот (ЦМВ) и позволяющего максимально подготовить интерферограмму к наиболее проблемному этапу обработки – развертыванию фазы – и гарантировать отсутствие глобальных ошибок на результирующей ЦМВ. Данный метод изложен в главе 4 диссертации. Новизна решений, положенных в основу метода, подтверждена патентом РФ.

Шестое направление. Наличие фазы в радиолокационном сигнале также позволяет регистрировать малые (сантиметровые) смещения объектов за период между двумя съемками с помощью дифференциальной интерферометрической обработки. Однако двухпроходная дифференциальная интерферометрия перестает быть всепогодной из-за неустранимого негативного влияния атмосферных искажений фазы, основными источниками которых являются водяной пар и облачность. Синхронное проведение оптико-электронной и радиолокационной съемок потенциально позволяет выявить облачность по оптическому изображению. В настоящее время наиболее качественные результаты сегментации облачности обеспечивают сверточные нейронные сети. Однако известные нейросетевые архитектуры требуют большого объема вычислений. Поэтому необходима разработка алгоритма на основе оптимизации известных нейросетевых архитектур с целью многократного сокращения объема вычислений при сохранении качества сегментации облачности. Теоретические основы алгоритма приведены в первом параграфе главы 5 диссертации.

Седьмое направление. Недостатки радиолокационной информации могут быть существенно уменьшены за счет объединения разнородных данных: радиолокационных и оптических изображений, интерферометрических и стереофотограмметрических цифровых матриц высот. Данные вопросы мало исследованы, поэтому актуальна разработка новых алгоритмов объединения разнородной информации. Теоретические аспекты данного направления изложены в последних трех параграфах главы 5 диссертации.

Восьмое направление. Связано с экспериментальным подтверждением эффективности результатов, достигнутых в рамках перечисленных выше направлений, на модельной и натурной информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ. Результаты экспериментальных исследований приведены в главе 6 диссертации.

Глава 2. Методы и алгоритмы бортового сжатия радиолокационной и оптической информации и уточнения угловых измерений оптико-электронных приборов по результатам анализа радиолокационных данных

В главе 2 обосновываются *Положения 1 и 2*, выносимые на защиту.

В рамках *Положения 1* разработаны алгоритмы бортового сжатия радиоголограмм и оптических изображений с уменьшенными потерями.

Алгоритм бортового сжатия радиоголограмм основан на неравномерном блочно-адаптивном квантовании квадратурных составляющих сигнала радиоголограммы с последующим энтропийным кодированием по Хаффману.

Пороги для квантования выбираются с учетом интегрального критерия, учитывающего средний квадрат ошибки квантования $D_{кв}$, среднюю длину кода Хаффмана $L_{Хаф}$ и улучшение отношения сигнал-шум $\Delta Q(N_{сфR}, N_{сф\eta})$ в ходе синтеза радиолокационного изображения из радиоголограммы при наземной обработке путем свертки с фильтром размером $N_{сфR} \times N_{сф\eta}$ пикселей:

$$(-10 \lg D_{кв} + \Delta Q(N_{сфR}, N_{сф\eta}) + 10 \lg N_{нн}) / L_{Хаф} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $N_{нн}$ – количество некогерентных накоплений при синтезе изображения.

Величина $\Delta Q(N_{сфR}, N_{сф\eta})$ представляется в виде комбинации улучшений отношения сигнал-шум в ходе одномерных фильтраций при сжатиях по дальности и азимуту:

$$\Delta Q(N_{сфR}, N_{сф\eta}) = \Delta Q_{ЛЧМ}(N_{сфR}) + \Delta Q_{ЛЧМ}(N_{сф\eta}). \quad (2)$$

Усредненная зависимость $\Delta Q_{ЛЧМ}(N_{сф})$ получена экспериментальным путем на основе сопоставлений значений отношения сигнал-шум квантования на радиоголограммах и радиолокационных изображениях, синтезированных из них с помощью фильтров различных размеров:

$$\Delta Q_{ЛЧМ}(N_{сф}) \approx 1,15 + 0,12 \lg N_{сф} + 0,0265 (\lg N_{сф} - 2,5)^6. \quad (3)$$

Для нахождения оптимальных порогов квантования t_k по критерию (1) предложен итерационный алгоритм, являющийся адаптацией метода покоординатного спуска к решаемой задаче и ограничениям $t_k < t_{k+1}$.

Вычислительно сложные расчеты порогов квантования в соответствии с предложенным итерационным алгоритмом выполняются однократно для каждого режима съемки при проектировании КА. Их результаты в виде наборов пороговых значений t_k для различного числа уровней квантования и разных режимов съемки могут быть заложены в память бортового вычислительного устройства. При этом собственно бортовое сжатие радиоголограмм не требует большого объема вычислений.

Алгоритм адаптивного бортового сжатия оптических изображений основан на применении искусственных нейронных сетей – автокодировщиков – для базового сжатия с потерями и нейросетевого прогнозирования с энтропийным арифметическим кодированием для дополнительного сжатия без потерь.

Предложенная базовая архитектура автокодировщика на основе сверточных нейронных сетей представлена на рисунке 1. Верхние два ряда слоев образуют кодировщик, нижние два ряда – декодировщик. Используются операции: «C2D» («Conv2D») – двумерная свертка (во второй строке указан размер

фильтра, в третьей – число выходных каналов, в последней – шаги скольжения фильтра); «DC2D» («Depthwise Conv2D») – поканальная двумерная свертка; «DHFC2D» – поканальная двумерная свертка фильтром с нулевой суммой коэффициентов; «DTS» («Depth To Space») – увеличение ширины и высоты изображения в 2 раза за счет сокращения числа каналов в 4 раза; «Quant» – блочно-адаптивное квантование; «NRM» и «DNRM» – нормализация и денормализация. Использование поканальных сверток вместо «Conv2D» позволяет сократить объем вычислений и число весовых коэффициентов с учетом ограниченности вычислительных ресурсов на борту КА.

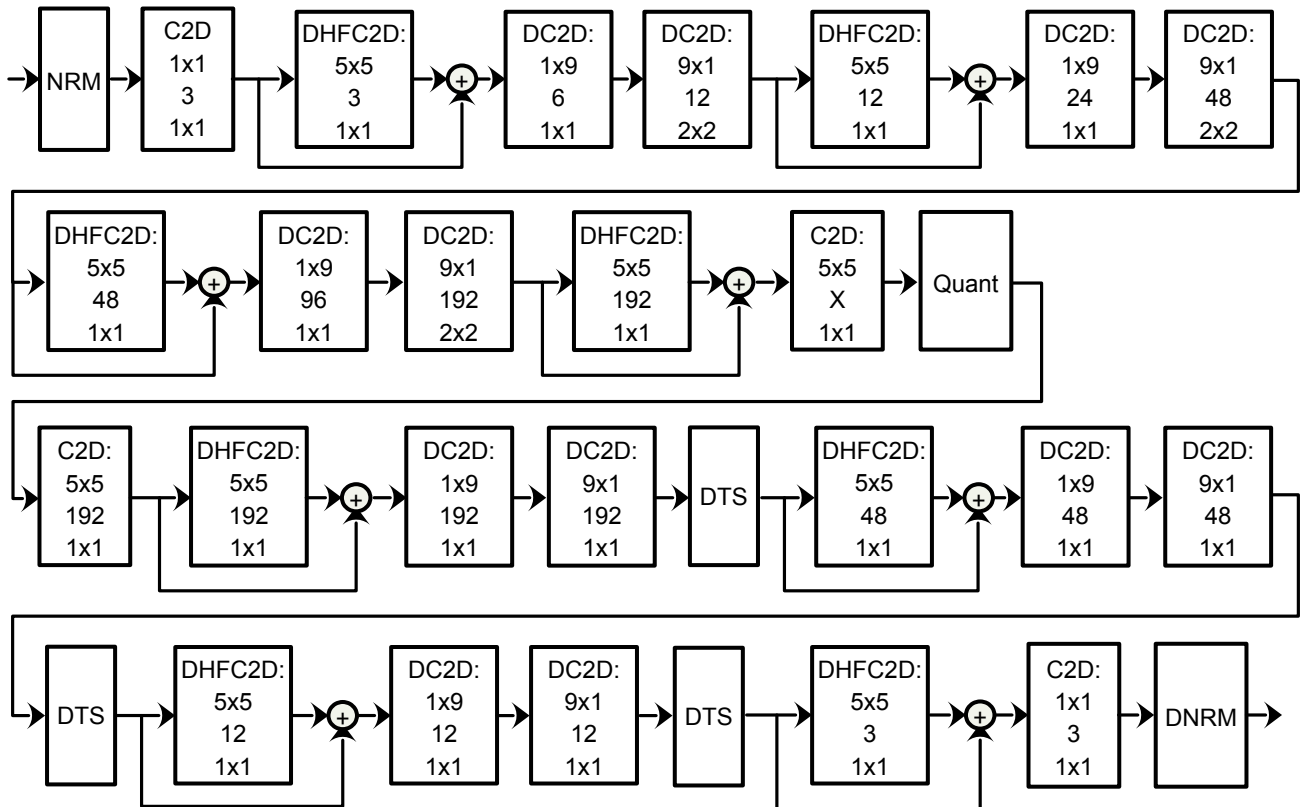


Рисунок 1 – Предлагаемая базовая архитектура автокодировщика

Чтобы избежать блочных артефактов при адаптивном сжатии, на основе предложенной базовой архитектуры обучаются семейство кодировщиков и единый декодировщик. Кодировщики имеют все слои, кроме двух последних, идентичные по параметрам и весовым коэффициентам. Свертка перед слоем квантования имеет различное число выходных каналов, а слой квантования обеспечивает разную разрядность выходных кодов для разных кодировщиков. Каждый следующий кодировщик формирует те же выходные каналы, что и предыдущий, дополняя их новыми каналами, а также квантуя с большей разрядностью.

При бортовом сжатии запускается кодировщик с максимальным числом выходных каналов, а затем адаптивно выбирается, сколько каналов и с какой разрядностью кодов записать в выходной поток. При наземной распаковке работает единый декодировщик, на вход которому идет максимальное количество каналов. Если в сжатом потоке часть каналов не приведена, они заполняются нулями.

Для дополнительного сжатия без потерь выходного сигнала кодировщика применяется архитектура нейронной сети, представленная на рисунке 2. Для предсказания следующего отсчета сигнала по предыдущим для каждого канала

на выходе кодировщика обучается отдельная нейронная сеть. В отличие от известных нейросетевых алгоритмов сжатия без потерь, предсказатели обучаются не в процессе сжатия/распаковки, а заранее, что позволяет существенно сократить объем вычислений непосредственно при сжатии.

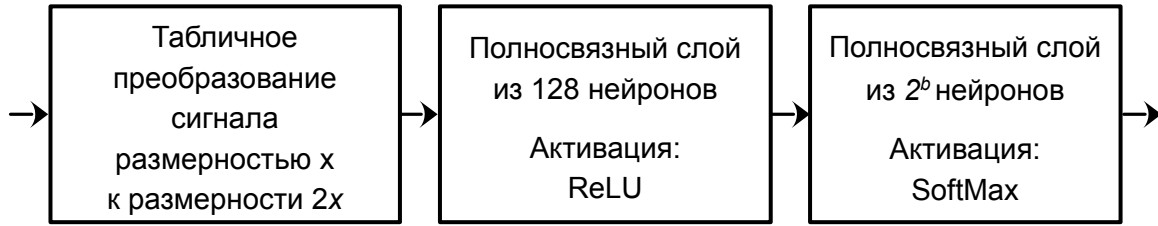


Рисунок 2 – Предлагаемая архитектура семейства предсказателей

Экспериментальные исследования, выполненные на серии изображений от зарубежных радиолокационных КА ДЗЗ и оптико-электронного КА «Канопус-В» и более подробно представленные в главе 6, показали, что рассмотренные два алгоритма позволяют при заданной степени сжатия уменьшить уровень искажений на 1–5% по сравнению с известными детерминированными аналогами.

В рамках **Положения 2** представлены методы уточнения угловой ориентации КА с совместным использованием измерений оптико-электронных приборов и результатов анализа радиолокационных изображений, сформированных в ходе первичной обработки.

Первый метод предназначен для уточнения углов рысканья и тангажа. В основу метода положено совместное оценивание относительного значения доплеровского центроида $f_{\text{дц отн}}$ и доплеровской неопределенности $M_{\text{дц}}$, выполняемое путем амплитудного анализа комплексного сигнала двух изображений, синтезированных из радиоголограммы по субапертурам. Совместность оценивания позволяет уточнить математическую модель пересчета геометрических рассогласований изображений в поправку к доплеровской неопределенности, учтя в ней ошибку $f_{\text{дц отн}}$ и дефекты синтеза изображений, возникшие из-за этого.

Оценивание $f_{\text{дц отн}}$ выполняется путем анализа амплитудного азимутального спектра суммарного комплексного сигнала двух изображений в пределах фрагмента, разбитого на малые подфрагменты:

$$f_{\text{дц отн}} = \frac{f_{\text{имп}}}{2\pi} \arg \sum_i \exp \left(j \cdot 2\pi \frac{f_i}{f_{\text{имп}}} \right) \sum_{k_\phi} A_{k_\phi}(f_i), \quad (4)$$

где $f_{\text{имп}}$ – частота повторения зондирующих импульсов, $A_{k_\phi}(f)$ – амплитудный азимутальный спектр k_ϕ -го малого подфрагмента, $f_i \in [-f_{\text{имп}}/2, f_{\text{имп}}/2)$ – частоты отсчетов азимутального спектра, j – мнимая единица.

В результате оценивания вычисляется погрешность относительного значения $\tilde{f}_{\text{дц отн}}$ доплеровского центроида, использованного при синтезе изображений:

$$\Delta f_{\text{дц отн}} = (f_{\text{дц отн}} - \tilde{f}_{\text{дц отн}}) \bmod f_{\text{имп}}. \quad (5)$$

Значение $\Delta f_{\text{дц отн}}$ определяет, как будет уточняться доплеровская неопределенность $M_{\text{дц}}$. Если $|\Delta f_{\text{дц отн}}| < f_{\text{имп}}/4$, $M_{\text{дц}}$ оценивается путем корреляционно-экстремального поиска горизонтального смещения фрагментов двух изоб-

ражений, одинаково расположенных по вертикали. В противном случае анализируются фрагменты, смещенные друг относительно друга по вертикали на $\Delta m = f_{имп}^2 / K_\eta$ пикселей, где K_η – доплеровская скорость.

При $|\Delta f_{доц\ отн}| < f_{имп}/4$ поправка к $M_{доц}$ вычисляется как

$$\Delta M_{доц} = \left[\frac{2 f_0^2 V_{лэ}^2 \Delta n}{(K_1 + K_2) f_{имп}^2 c R_\perp f_{дискр}} \right], \quad (6)$$

где f_0 – несущая частота зондирующих импульсов, $V_{лэ}$ – линейная эквивалентная скорость, c – скорость света в вакууме, R_\perp – наклонная дальность на траверзе (средняя в пределах фрагмента), $f_{дискр}$ – частота дискретизации эхо-сигналов, Δn – найденное горизонтальное смещение фрагментов двух изображений в пикселях, $[x]$ – округление до ближайшего целого.

При $\Delta f_{доц\ отн} \leq -f_{имп}/4$

$$\Delta M_{доц} = \left[\frac{2 f_0^2 V_{лэ}^2 \Delta n}{(K_1 + K_2 - 1) f_{имп}^2 c R_\perp f_{дискр}} + \frac{\tilde{f}_{доц} - (0,5 - K_2) f_{имп}}{(K_1 + K_2 - 1) f_{имп}} \right], \quad (7)$$

где $\tilde{f}_{доц}$ – абсолютное значение доплеровского центроида, использованное при синтезе изображений.

При $\Delta f_{доц\ отн} \geq f_{имп}/4$

$$\Delta M_{доц} = \left[\frac{2 f_0^2 V_{лэ}^2 \Delta n}{(K_1 + K_2 - 1) f_{имп}^2 c R_\perp f_{дискр}} + \frac{\tilde{f}_{доц} + (0,5 - K_1) f_{имп}}{(K_1 + K_2 - 1) f_{имп}} \right]. \quad (8)$$

Коэффициенты K_1 и K_2 находятся на основе интегрирования по доплеровской частоте квадрата азимутальной диаграммы направленности антенны (ДНА) радиолокатора. Пределы интегрирования определяются значением $\Delta f_{доц\ отн}$.

Если максимум коэффициента корреляции Пирсона, достигнутый при нахождении Δn , слишком мал, полученные оценки $f_{доц\ отн}$ и $\Delta M_{доц}$ отбраковываются. В противном случае вычисляется уточненное абсолютное значение доплеровского центроида как $f_{доц\ отн} + (\tilde{M}_{доц} + \Delta M_{доц}) f_{имп}$, где $\tilde{M}_{доц}$ – значение доплеровской неопределенности, использованное при синтезе двух изображений.

Для оценивания вариаций доплеровского центроида по полю изображения описанная процедура применяется к различным фрагментам, центры которых располагаются на некоторой квадратной сетке. Пространственные вариации поправки $\Delta f_{доц}$ к значению доплеровского центроида аппроксимируются полиномом малой степени. Если максимальное значение поправки по полю изображения достаточно велико, требуется повторный синтез по субапертурам двух изображений из радиоголограммы с уточненным значением доплеровского центроида. Для получения заданной точности может потребоваться несколько таких итераций. Предложенные решения позволяют сократить число итераций по сравнению с известными подходами, а также обеспечить устойчивость оценивания к случаям, когда $|\Delta f_{доц\ отн}| \rightarrow f_{имп}/2$.

Окончательно найденные поправки к значению доплеровского центроида по геометрической модели радиолокационной съемки пересчитываются в поправки к углам рысканья и тангажа КА, измеренным оптико-электронными приборами.

Экспериментальные исследования на данных от КА «COSMO-SkyMed», показали, что предложенный метод позволяет более чем на 25 % сократить временные затраты на уточнение углов рысканья и тангажа (см. главу 6).

Второй метод предназначен для уточнения угла крена. Он основан на выявлении формы угломестной ДНА путем статистического анализа амплитудного сигнала радиолокационного изображения, сопоставлении ее с эталонной ДНА и определении их смещения друг относительно друга вдоль угломестной оси. Выявленное смещение является поправкой к углу крена КА, измеренному оптико-электронными приборами.

В основу метода положена гипотеза, что наблюдаемый участок земной поверхности можно представить в виде преобладающей совокупности радиометрически однородных объектов, каждый из которых имеет собственную удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) и отделен от других объектов резкими границами.

В рамках приведенной гипотезы форма ДНА анализируется с использованием величины, не зависящей от УЭПР конкретного однородного объекта:

$$\partial_A(m, n) = \frac{da_{R\gamma_0}(m, n)/d\alpha_m}{a_{R\gamma_0}(m, n)}, \text{ где } a_{R\gamma_0} - \text{амплитудный сигнал радиолокационного}$$

изображения, преобразованный в УЭПР гамма-ноль с коррекцией затухания при увеличении дальности, α_m – угол места, (m, n) – координаты пикселя. Для радиометрически однородных объектов значение этой величины должно быть равно отношению $\delta_w(\alpha_m) = w'_\alpha(\alpha_m)/w_\alpha(\alpha_m)$, где $w_\alpha(\alpha_m)$ – квадрат эталонной угломестной ДНА.

Возможный диапазон изменений α_m разбивается на поддиапазоны с центрами $\alpha_{m\partial k}$, для каждого из которых вычисляется среднее значение $\partial_A(m, n)$ с получением кривой $\delta_A(\alpha_{m\partial k})$. При усреднении $\partial_A(m, n)$ отбраковываются пиксели, в которых $\partial_A(m, n)$ значительно отклоняется от $\delta_w(\alpha_m)$. Считается, что такие пиксели не принадлежат однородным объектам.

На основе минимизации суммы квадратов отклонений $\delta_A(\alpha_{m\partial k})$ и $\delta_w(\alpha_m)$ ищется их смещение друг относительно друга вдоль оси α_m , признаваемое поправкой к углу крена КА.

Процесс оценивания выполняется итерационно, поскольку при больших начальных ошибках может некорректно выполняться отбраковка радиометрически неоднородных объектов. Если на последней итерации доля отбракованных пикселей превышает заданный порог, оценки считаются недостоверными.

Экспериментальные исследования с использованием данных от КА «TerraSAR-X», показали, что рассматриваемый метод позволяет получить оценку угла крена с точностью порядка 1,5' (см. главу 6).

Глава 3. Метод и алгоритмы геодезической привязки, геометрической обработки и объединения радиолокационных изображений с привлечением оптических данных

В главе 3 выдвигаются *Положения 3 и 4*, выносимые на защиту.

В рамках *Положения 3* разработаны три алгоритма, нацеленные на повышение точности геодезической привязки радиолокационного изображения за счет его совмещения с опорным оптическим снимком и увеличение скорости геометрических преобразований за счет полиномиальных аппроксимаций.

Алгоритм уточнения геодезической привязки на основе совмещения радиолокационного и оптического изображений. Перед совмещением опорный оптический снимок деортотрансформируется в антенную или путевую систему координат радиолокационного изображения. Последнее подвергается логарифмическому преобразованию: $s_{p\log}(m, n) = \log(|s_p(m, n)| + 1)$, где $|s_p(m, n)|$ – радиояркости.

Геометрические рассогласования двух изображений описываются малопараметрической полиномиальной моделью. Степень полинома может понижаться вплоть до нуля, если опорные точки для его построения локализуются в пределах малой части площади изображений.

Геометрические рассогласования двух изображений выявляются на основе корреляционно-экстремального совмещения, которое может быть вычислительно эффективно выполнено при больших размерах искомого фрагмента и области поиска с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Фрагменты для совмещения выбираются на регулярной решетке, шаг которой постепенно уменьшается, если не нашлось достаточного количества фрагментов, результаты корреляции которых хорошо согласуются с малопараметрической моделью, построенной по весовому методу наименьших квадратов (МНК).

Также введен критерий, позволяющий отбраковать абсолютное большинство ложных результатов корреляции, вызванных существенной разнородностью радиолокационного и оптического изображений. Это критерий устойчивости результатов к изменению размера коррелируемого фрагмента. Первоначальный фрагмент радиолокационного изображения делится на четыре равные части, каждая из которых независимо подвергается корреляционному совмещению с оптическим снимком. Если для фрагмента и не менее $N_{\text{част}}$ из 4 его частей максимум модуля коэффициента корреляции Пирсона превышает выбранный порог и положения точек максимума модуля корреляционной функции отличаются не более чем на выбранную величину, то результаты совмещения признаются достоверными. В противном случае они отбраковываются.

Если для отдельного фрагмента не удалось получить достоверные результаты совмещения, то на радиолокационном и оптическом изображениях с помощью оператора Собеля выделяются контуры объектов, и предпринимается новая попытка корреляционного совмещения.

На основе результатов совмещения отдельных фрагментов, признанных надежными, рассчитываются значения параметров модели геометрического рассогласования. Если среднеквадратические невязки σ_{pm} и σ_{pn} полиномиальной аппроксимации по двум координатам велики, итерационно выполняется отбраковка

результатов корреляции, отклоняющихся от малопараметрической модели сильнее, чем на σ_{pm} и σ_{pn} , с повторным расчетом параметров модели по МНК.

Если размер области поиска слишком велик, то для сокращения объема вычислений вводится многомасштабное совмещение. Для этого на первом этапе существенно снижается частота дискретизации изображений и в соответствии с описанным алгоритмом находится приближенная модель их рассогласований. Затем на втором этапе определяются значения параметров более точной модели рассогласования изображений, представленных с большей частотой дискретизации. При этом за счет выполнения первого этапа область поиска выбирается малой.

По результатам построения малопараметрической полиномиальной модели геометрических рассогласований радиолокационного и опорного оптического изображений выполняется расчет поправок к параметрам строгой геометрической модели геодезической привязки радиолокационного изображения.

Для этого записывается минимизируемая взвешенная сумма квадратов невязок по широте и долготе в точках, равномерно распределенных по полю изображения: $F_{geo} = \sum_k w_k (F_{Bk}^2 + F_{Lk}^2)$, где $F_{Bk} = B_{yk} - B_{onk}$, $F_{Lk} = (L_{yk} - L_{onk}) \cos B_{onk}$, w_k – весовые коэффициенты, (B_{yk}, L_{yk}) – измеренные по строгой модели широта и долгота k -й точки, (B_{onk}, L_{onk}) – опорные координаты, полученные с учетом малопараметрической полиномиальной модели геометрических рассогласований с оптическим снимком.

Зависимость F_{Bk} и F_{Lk} от параметров строгой модели линеаризуется в окрестности точки гиперпространства, соответствующей текущим параметрам строгой модели, с использованием частных производных функций F_{Bk} и F_{Lk} по каждому из параметров. По результатам линеаризации составляется система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), псевдорешение которой по МНК дает уточненные значения параметров строгой модели. Процесс линеаризации и решения СЛАУ продолжается, до тех пор пока на очередной итерации изменение параметров строгой модели не станет достаточно малым.

Достигнутое совмещение радиолокационного изображения с оптическим снимком позволяет повысить точность геодезической привязки первого из них.

Алгоритм эффективной организации массовых координатных преобразований при геометрической обработке радиолокационного изображения и его совмещении с оптическим снимком. Для уменьшения объема вычислений при ортотрансформировании радиолокационных изображений и при деортотрансформировании опорных оптических снимков предложена упрощенная модель массовых координатных преобразований на основе трехмерных решеток с кусочно-параболической интерполяцией между узлами. Показано, что одно координатное преобразование для трипараболического интерполятора асимптотически сводится к двенадцати сложениям и одномерной интерполяции параболой. Предложен алгоритм выбора шага решетки, обеспечивающий заданную точность аппроксимации массовых координатных преобразований.

Алгоритм высокоскоростного совмещения интерферометрической пары радиолокационных изображений с привлечением оптических высотных данных. Для уменьшения объема вычислений при геометрическом совмещении интер-

ферометрической пары радиолокационных изображений с учетом опорных стереофотограмметрических данных о высоте предложена полиномиальная модель аппроксимации массовых координатных преобразований. Диапазон высот рельефа снимаемого фрагмента земной поверхности разбивается на L_h равных отрезков с помощью (L_h+1) значений высоты h_l . По МНК выполняется построение (L_h+1) полиномиальных моделей совмещения изображений для полученных высот h_l :

$$P_{ml}(m_1, n_1) = \sum_{o,p}^{o+p \leq N_n} k_{mlop} m_1^o n_1^p, \quad P_{nl}(m_1, n_1) = \sum_{o,p}^{o+p \leq N_n} k_{nlop} m_1^o n_1^p, \quad (9)$$

где N_n – степень полиномов, (m_i, n_i) – координаты пикселя на i -м изображении.

При массовых координатных преобразованиях с помощью сложений последовательно вычисляются значения полиномов $P_{ml}(m_1, n_1)$ и $P_{nl}(m_1, n_1)$. Затем осуществляется интерполяция по высоте путем построения полиномов степени L_h по точкам $(h_l, P_{ml}(m_1, n_1))$ для расчета m_2 и по точкам $(h_l, P_{nl}(m_1, n_1))$ для расчета n_2 . Результат координатного преобразования получается как значение построенных полиномов в точке $h = h_{опор}(m_1, n_1)$.

Параметры полиномиальной модели могут быть уточнены по результатам корреляционно-экстремального совмещения интерферометрической пары изображений, выполняемого аналогично совмещению с опорным оптическим снимком. Полученные в результате совмещения коэффициенты полиномиальной малопараметрической модели геометрических рассогласований изображений прибавляются к соответствующим коэффициентам полиномов $P_{ml}(m_1, n_1)$ и $P_{nl}(m_1, n_1)$.

Проведены исследования на натурной информации, показавшие многократное повышение скорости обработки по сравнению с известными аналогами. Численные оценки приведены в главе 6.

В рамках **Положения 4** представлен метод объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики и использования низкодетальной высотной информации от оптико-электронных систем с целью уменьшения площади геометрических дефектов (переналоженных сигналов и затенений) без возникновения ложных резких границ.

Правила объединения сформулированы в терминах нечеткой логики:

$$s_{об}(m_k, n_k) = \mu(A_1)s_1(m_k, n_k) + \mu(A_2)s_2(m_k, n_k) + \mu(A_{12})F_{слияния}(s_1(m_k, n_k), s_2(m_k, n_k)), \quad (10)$$

где (m_k, n_k) – пиксель изображения в картографической проекции, A_1 , A_2 и A_{12} – нечеткие логические условия, определяющие, какими данными заполняется пиксель выходного изображения: сигналом одного из исходных изображений s_1 и s_2 или результатом $F_{слияния}$ мультитременной фильтрации спекл-шума на изображении s_1 с привлечением s_2 , $\mu(A)$ – степень истинности A .

Введенные выше условия A_1 , A_2 и A_{12} формулируются с помощью логических операций на основе четырех базовых признаков: L_1 и L_2 – наличия переналожения сигналов в анализируемом пикселе первого и второго изображения, S_1 и S_2 – попадания анализируемого пикселя первого и второго изображения в область радиотени:

$$\begin{aligned} A_1 &= \overline{L_1} \wedge (S_2 \wedge \overline{S_1} \vee L_2), & A_2 &= \overline{L_2} \wedge (S_1 \wedge \overline{S_2} \vee L_1), \\ A_{12} &= \overline{A_1} \vee \overline{A_2} = (L_1 \vee (\overline{S_2} \vee S_1) \wedge \overline{L_2}) \wedge (L_2 \vee (\overline{S_1} \vee S_2) \wedge \overline{L_1}). \end{aligned} \quad (11)$$

Нечеткие конъюнкции и дизъюнкции реализуются с помощью Т-нормы и Т-конормы нечеткой логики Лукасевича, обеспечивающей выполнение условия $\mu(A_1) + \mu(A_2) + \mu(\overline{A_1} \vee \overline{A_2}) = 1$.

Степени истинности нечетких признаков наличия переналожения сигналов вычисляются по результатам анализа степени растяжения пикселей в процессе деортотрансформирования радиолокационного изображения, представленного в картографической проекции:

$$\mu(L_i) = \begin{cases} 1, & k_{расм} < \theta_{L1}, \\ 1 - \frac{k_{расм} - \theta_{L1}}{\theta_{L2} - \theta_{L1}}, & \theta_{L1} \leq k_{расм} \leq \theta_{L2}, \\ 0, & k_{расм} > \theta_{L2}, \end{cases} \quad (12)$$

где θ_{L1} и θ_{L2} – пороги, соответствующие деградации разрешения в 2 и 4/3 раза, $k_{расм}$ – коэффициент растяжения пикселя.

Для определения S_1 и S_2 с учетом опорных низкодетальных стереофотограмметрических данных о высоте выполняется трассировка лучей, позволяющая получить границу тени от каждого наблюдаемого объекта. Степени истинности нечетких признаков затенения выражаются как функция возвышения Δh_m наблюдаемого объекта над тенью от более близких к радиолокатору объектов:

$$\mu(S_i) = \begin{cases} 1, & \Delta h_m < 0, \\ 1 - \frac{\Delta h_m}{\theta_S}, & 0 \leq \Delta h_m \leq \theta_S, \\ 0, & \Delta h_m > \theta_S, \end{cases} \quad (13)$$

где $\theta_S = 0,3 d_m / \operatorname{tg} \alpha_{над}$, d_m – шаг трассировки луча вдоль земной поверхности для вычисления Δh_m , $\alpha_{над}$ – угол падения зондирующего сигнала на поверхность земного эллипсоида.

Плавное изменение значений $\mu(L_i)$ и $\mu(S_i)$ обеспечивает плавность перехода от одного изображения к другому на результате объединения без образования ложных резких границ – «швов».

Экспериментальные исследования на натурной информации, подробно приведенные в главе 6, показали, что рассматриваемый метод позволяет многократно уменьшить площадь геометрических искажений без образования ложных границ.

Глава 4. Метод высокоточной обработки интерферометрических изображений с привлечением низкодетальной стереофотограмметрической информации

В главе 4 выдвигается и обосновывается *Положение 5*, выносимое на защиту. В его рамках представлен *метод высокоточной обработки радиолокационных интерферометрических изображений с целью формирования детальных цифровых моделей высот* на основе анализа интерферограммы и привлечения низкодетальной стереофотограмметрической информации от оптико-электронных систем ДЗЗ.

Перед выполнением интерферометрической обработки осуществляется объединение привлекаемых низкодетальных стереофотографических ЦМВ от различных систем ДЗЗ с целью повышения точности. Среди ЦМВ выбирается наиболее точная в качестве базовой. Результат объединения совпадает с базовой ЦМВ во всех участках, кроме тех, где выявлены артефакты (локальные грубые ошибки высоты). Выделены два основных типа артефактов. Первый тип артефактов – ошибочное выделение водной поверхности – выявляется по критерию, что высота значительной части берега ниже, чем у водной поверхности. Второй тип артефактов – грубые локальные ошибки с резкими границами – выявляется путем сопоставления объединяемых ЦМВ. Считается, что выявленная изолированная область существенных отличий объединяемых ЦМВ обусловлена ошибкой на базовой ЦМВ, если средний модуль градиента высоты в направлении нормали к границе области оказывается на ней существенно больше, чем на другой ЦМВ. Выявленные на базовой ЦМВ участки с ошибками высоты заполняются данными альтернативных ЦМВ с обеспечением бесшовной стыковки на краях участков путем построения корректирующей поверхности на основе фильтра обратных взвешенных расстояний.

Результат объединения низкодетальных стереофотограмметрических ЦМВ $h_{опор}(B_u, L_u)$ трансформируется в антенную систему координат интерферограммы. При этом для каждого пикселя итерационно решается система уравнений относительно h_u :

$$\begin{cases} (B_u, L_u) = F_{geo}(m, n, h_u), \\ h_u = h_{опор}(B_u, L_u), \end{cases} \quad (14)$$

где $F_{geo}(m, n, h_u)$ – строгая модель привязки радиолокационного изображения.

В процессе трансформирования выявляются пиксели с переналожением сигналов, в которых система (14) имеет более одного решения. Такие пиксели отбраковываются на последующих этапах обработки.

Предложена адаптация медианного фильтра для обработки фазы, отличающейся периодическим характером и без применения специальных мер не подлежащей упорядочиванию. В основе адаптации лежит предположение, что в пределах малого прямоугольного окна фаза на интерферограмме $\Delta\varphi_{св}(m, n)$ изменяется практически линейно, причем отклонения от аппроксимирующей линейной зависимости не превышают половину фазового периода:

$$\begin{aligned} F_{Me}(\Delta\varphi_{св}(m, n)) = \\ = \arg(\exp(j(Me\{\arg\exp(j(\Delta\varphi_{св}(m+k, n+l) - \varphi_{ср} - G_{хср}l - G_{уср}k))\} \\ k, l = \overline{-r_{Me}, r_{Me}} + \varphi_{ср}))), \end{aligned} \quad (15)$$

где Me – медиана, r_{Me} – радиус фильтра, φ_{cp} , G_{xcp} и G_{ycp} – параметры линейной аппроксимации.

Адаптированный медианный фильтр применяется для более точного расчета когерентности – меры зашумленности фазы, а также для дополнительной фильтрации интерферограммы после применения известного фильтра Голдштейна.

На основе трассировки лучей по аналогии с методом, предложенным в рамках **Положения 4**, выявляются и отбраковываются пиксели, соответствующие областям затенения, с учетом $h_{опор}(m, n)$. Из-за недостаточной детальности $h_{опор}(m, n)$ выполняется уточнение границ отбракованных областей путем анализа амплитуды сигнала радиолокационных изображений, разность фаз которых составляет интерферограмма. Считаются теньевыми и отбраковываются пиксели (m, n) , для которых выполняются условия $\Delta h_m(k, l) \leq 0$, $\sqrt{(m-k)^2 + (n-l)^2} \leq r_{опор}$ и $\hat{a}(m, n) \leq \hat{a}_m k_{m \text{ запас}}$, где $r_{опор}$ – округленный вверх до целого результат отношения шагов пикселя низкодетальных стереофотограмметрических данных и интерферограммы, $k_{m \text{ запас}} > 1$ – коэффициент запаса, $\hat{a}(m, n)$ – усредненная амплитуда радиолокационного сигнала, \hat{a}_m – среднее значение $\hat{a}(m, n)$ в пикселях, для которых $\Delta h_m(m, n) \leq 0$.

Погрешности знания интерферометрической базы, вызванные неточностью измерительной информации, приводят к неполному устранению набега фазы плоского рельефа и мультипликативной ошибке пересчета высоты в топографическую фазу. Данные негативные эффекты предлагается устранять в 3 этапа.

На 1-м этапе – этапе предварительного уточнения фазы плоского рельефа – устраняются значительные ошибки выравнивания интерферограммы. Из интерферограммы $\Delta \tilde{\varphi}_{\text{выравн св}}(m, n)$, выравненной с использованием измерительной информации, вычленяется остаточная фаза плоского рельефа $\Delta \varphi_{\text{плоск}}$ путем вычитания опорной топографической фазы $\tilde{\varphi}_{\text{моно}}$, рассчитанной по $h_{опор}(m, n)$, размытия и прореживания до разрешения опорных данных. На основе средневзвешенных градиентов полученной фазы вычисляются приближенные оценки коэффициентов линейной аппроксимации $\Delta \varphi_{\text{плоск}}$. Фаза корректируется, к ней обратно прибавляется $\tilde{\varphi}_{\text{моно}}$ с получением $\Delta \varphi_{\text{осм1 св}}$.

На 2-м этапе ищется мультипликативная зависимость $\Delta \varphi_{\text{осм1 св}}$ от $\tilde{\varphi}_{\text{моно}}$. Если коэффициент этой зависимости δ_σ отличен от единицы, вносится мультипликативная поправка в правила прямого и обратного пересчета топографической фазы в высоту: $\varphi_{\text{моно}}(m, n) = \delta_\sigma \tilde{\varphi}_{\text{моно}}(m, n)$.

На 3-м этапе формируется сигнал $\Delta \varphi_{\text{осм2 св}} = \arg(\exp(j(\Delta \varphi_{\text{осм1 св}} - \varphi_{\text{моно}})))$. Остаточная фаза плоского рельефа оценивается на основе аппроксимации:

$$\Delta \varphi_{\text{осм2 св}} \approx \Delta \tilde{k}_n \text{плоск} n + \Delta \tilde{k}_m \text{плоск} m + \Delta \tilde{b}_{\text{плоск}}. \quad (16)$$

Коэффициенты аппроксимации (16) находятся по МНК, адаптированному к периодическому характеру фазы. Сначала путем полного перебора определяется, сколько полных периодов составляет набег $\Delta \varphi_{\text{осм2 св}}$ вдоль всей строки и всего столбца интерферограммы. Затем выполняется итерационное приближение к оптимальным значениям коэффициентов.

После окончательного выравнивания интерферограммы и фильтрации шумов на ней становится возможным окончательное выявление областей переналожения сигналов. Изменение фазы, соответствующее резкому уменьшению высоты в направлении увеличения дальности, является недопустимым, поскольку в этом случае более дальний пиксель должен был бы попасть в область радиотени. Считается, что такие изменения фазы вызваны переналожением сигналов, а соответствующие им пиксели отбраковываются.

Если интерферометрическая съемка двух радиоголограмм велась асинхронно, на фильтрованной интерферограмме $\Delta\varphi_{\text{фильтр св}}(m, n)$ присутствуют атмосферные искажения фазы, которые, во-первых, вносят ошибку в формируемые ЦМВ, а во-вторых, мешают сопоставлению сигнала интерферограммы с опорной топографической фазой на последующих этапах обработки. Устранение атмосферных искажений заключается в подавлении низких частот на результате вычитания из интерферограммы опорной топографической фазы:

$$\varphi_{\text{разн св}}(m, n) = \arg(F_{\text{атм}} \{ \exp(j(\Delta\varphi_{\text{фильтр св}}(m, n) - \varphi_{\text{моно}}(m, n))) \}). \quad (17)$$

В качестве $F_{\text{атм}}$ предлагается:

$$F_{\text{атм}} \{s(m, n)\} = s(m, n) - \frac{g_{\sigma_{\Gamma m}, \sigma_{\Gamma n}} * (w_{\varphi}(m, n)s(m, n))}{g_{\sigma_{\Gamma m}, \sigma_{\Gamma n}} * w_{\varphi}(m, n)}, \quad (18)$$

где $g_{\sigma_{\Gamma m}, \sigma_{\Gamma n}}$ – двумерный фильтр Гаусса с параметрами $\sigma_{\Gamma m}$ и $\sigma_{\Gamma n}$, $w_{\varphi}(m, n)$ – весовые коэффициенты, нулевые в отбракованных пикселях и определяемые коэффициентом когерентности в остальных случаях.

Основной проблемой интерферометрии является развертывание фазы – переход от свернутых значений $\varphi_{\text{св}}(m, n)$ из полуинтервала $(-\pi, \pi]$ к истинным значениям $\varphi(m, n) = \varphi_{\text{св}}(m, n) + 2\pi k_{\text{разв}}(m, n)$, $k_{\text{разв}} \in \mathbb{Z}$. В основе развертывания фазы лежит восстановление ее градиента в предположении, что за один пиксель фаза изменяется менее чем на половину периода:

$$\begin{aligned} G_{x \text{ св}}(m, n) &= \arg(\exp(j(\varphi_{\text{св}}(m, n+1) - \varphi_{\text{св}}(m, n)))), \\ G_{y \text{ св}}(m, n) &= \arg(\exp(j(\varphi_{\text{св}}(m+1, n) - \varphi_{\text{св}}(m, n)))). \end{aligned} \quad (19)$$

Нарушение предположения о плавности изменений фазы в отдельных пикселях принято называть фазовым разрывом. Разрывы располагаются вдоль некоторых линий, которые заканчиваются либо на границе интерферограммы или отбракованной области низкой когерентности, либо в так называемых сингулярных точках, в которых $\text{rot } \mathbf{G}_{\text{св}}(m, n) \neq 0$, где $\mathbf{G}_{\text{св}} = (G_{x \text{ св}}, G_{y \text{ св}})^T$. Знак $\text{rot } \mathbf{G}_{\text{св}}(m, n)$ определяет заряд точки. Сумма зарядов сингулярных точек на противоположных концах одной линии разрыва равняется нулю.

Короткие линии разрыва фазы предложено выявлять на основе предположения, что они вероятнее всего ориентированы перпендикулярно к направлению локального наклона фазовой поверхности, с помощью комбинации модифицированных известных алгоритмов Голдштейна–Зибкера–Вернера и Костантини. Первый алгоритм является «жадным» и за один проход интерферограммы пытается попарно сгруппировать сингулярные точки. В результате модификации один проход заменен несколькими. При каждом следующем проходе увеличивается максимальное расстояние между соединяемыми сингулярными точками.

В алгоритме Костантини интерферограмма заменяется транспортной сетью, а сингулярные точки – источниками и стоками (в зависимости от знака). Парная группировка сингулярных точек заменяется проведением потока минимальной стоимости по дугам сети из источников в стоки. В результате модификации в структуру сети введены диагональные дуги, позволяющие более гибко управлять предпочтительным направлением проведения потока. Вместо оптимизации по всем источникам и стокам, единицы потока проводятся между конкретными парами, выбранными модифицированным первым алгоритмом. По результатам проведения потока корректируются оценки фазового градиента:

$$\begin{aligned}
 G_{x_{КЛР}}(m, n) &= G_{x_{св}}(m, n) + 2\pi (k_{\downarrow}(m-0,5, n+0,5) - k_{\uparrow}(m+0,5, n+0,5) + \\
 &\quad + k_{\nearrow}(m-0,5, n+0,5) + k_{\nwarrow}(m-0,5, n-0,5) - \\
 &\quad - k_{\nearrow}(m+0,5, n+0,5) - k_{\nwarrow}(m+0,5, n+1,5)); \\
 G_{y_{КЛР}}(m, n) &= G_{y_{св}}(m, n) + 2\pi (k_{\leftarrow}(m+0,5, n+0,5) - k_{\rightarrow}(m+0,5, n-0,5) + \\
 &\quad + k_{\nearrow}(m-0,5, n+0,5) - k_{\nwarrow}(m+0,5, n-0,5) - \\
 &\quad - k_{\nearrow}(m+1,5, n-0,5) - k_{\nwarrow}(m+0,5, n+0,5)), \quad (20)
 \end{aligned}$$

где k_{\downarrow} , k_{\uparrow} , k_{\leftarrow} , k_{\rightarrow} , k_{\nearrow} , k_{\nwarrow} , k_{\searrow} и k_{\swarrow} – количество единиц потока, проведенного по дуге в направлении, указанном стрелкой.

Длинные линии разрыва фазы предварительно выявляются в окрестности резких изменений крутизны и/или направления локального наклона фазовой поверхности с временным обнулением весовых коэффициентов в соответствующих пикселях. Окончательная идентификация основана на итерационном поиске точек локальных максимумов модуля вектора невязок градиента, возникающих на прошедшем высокочастотную фильтрацию результате развертывания фазы по весовому критерию наименьших квадратов:

$$\begin{aligned}
 &\sum_{m,n} \min(w_{\varphi i}(m, n), w_{\varphi i}(m, n+1)) (G_{x_{МНК i}}(m, n) - G_{x_{КЛР}}(m, n))^2 + \\
 &+ \sum_{m,n} \min(w_{\varphi i}(m, n), w_{\varphi i}(m+1, n)) (G_{y_{МНК i}}(m, n) - G_{y_{КЛР}}(m, n))^2 \rightarrow \min. \quad (21)
 \end{aligned}$$

На каждой следующей итерации обнуляется часть весовых коэффициентов $w_{\varphi i}(m, n)$. Высокочастотная фильтрация, предварительное вычитание из интерферограммы опорной топографической фазы и устранение атмосферных искажений гарантируют, что возможные ошибки развертывания фазы будут локализованы в пределах нескольких пикселей опорных низкодетальных стереофотограмметрических данных.

Построенная в конце итерационного процесса фазовая поверхность $\varphi_{МНК}(m, n)$ является первым приближением развернутой фазы. Однако не гарантируется, что $\varphi_{МНК}(m, n)$ в каждом пикселе отличается от свернутой фазы на целое число периодов. Поэтому выполняется окончательное развертывание фазы, включающее:

- 1) восстановление развернутой фазы в крупных областях ненулевого веса;
- 2) восстановление развернутой фазы в малых областях ненулевого веса;
- 3) проведение разрывов в участках нулевого веса;
- 4) уточнение положения проведенных фазовых разрывов в пределах нескольких пикселей опорных стереофотограмметрических данных;

5) заполнение отбракованных областей.

Окончательно развернутая фаза после обратного прибавления опорной топографической фазы пересчитывается в матрицу высот, которая затем ортотрансформируется в картографическую проекцию с получением результирующей детальной ЦМВ.

Проведены экспериментальные исследования, показавшие, что рассматриваемый метод на порядок превосходит по точности известные зарубежные аналоги. Численные оценки приведены в главе 6.

Глава 5. Алгоритмы объединения разнородной информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли

В главе 5 обосновываются *Положения 6 и 7*, выносимые на защиту.

В рамках *Положения 6* разработан алгоритм высокоскоростной нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных дифференциальных интерферограммах.

Для сегментации облачности разработана нейросетевая архитектура «Lanky U-Net» (рисунок 3), отличающаяся от известной аналогичной архитектуры «U-Net» примерно в 22 раза меньшим объемом вычислений за счет сокращения количества сверточных слоев и числа каналов на их выходе. При этом увеличение на единицу высоты пирамиды позволяет сохранить размер анализируемой окрестности пикселя, как у «U-Net». На рисунке 3 использованы обозначения: «СХХ» – операция «Conv2D» двумерной свертки в окне $X \times X$ пикселей; «МРХ» – операция «MaxPooling» с прореживанием изображения в X раз по строкам и столбцам; «УСХ» – операция «Upscale» уменьшения в X раз шага дискретизации изображения с интерполяцией по ближайшему соседу; «С» – операция объединения нескольких изображений одинаковой ширины и высоты в одно изображение с большим числом каналов; «BR» – пакетная нормализация с активацией «линейный выпрямитель» (ReLU); «S» – активационная функция сигмоида. Во второй строке надписи для каждого слоя указано число выходных каналов.

Для обучения «Lanky U-Net» предложена функция потерь вида

$$1 - \tilde{a}_{сегм} = 1 - \frac{1}{\sum_{m_{онм}, n_{онм}} 1} \left(\sum_{m_{онм}, n_{онм}} E_{сегм}(m_{онм}, n_{онм}) C_{сегм}(m_{онм}, n_{онм}) + \right. \\ \left. + \sum_{m_{онм}, n_{онм}} (1 - E_{сегм}(m_{онм}, n_{онм})) (1 - C_{сегм}(m_{онм}, n_{онм})) \right), \quad (22)$$

где $E_{сегм}(m_{онм}, n_{онм})$ – эталонная маска облачности, сформированная вручную на основе визуального анализа исходного изображения, $C_{сегм}(m_{онм}, n_{онм})$ – результат на выходе нейронной сети. Потери рассчитывались лишь по центральной части фрагмента изображения, чтобы избежать влияния краевых эффектов операции свертки. Значение функции $\tilde{a}_{сегм}$ очень близко к показателю общей точности (ассигасу) сегментации $a_{сегм}$, но при этом $\tilde{a}_{сегм}$ дифференцируема и может использоваться в методах обучения на основе стохастического градиентного спуска и обратного распространения ошибки.

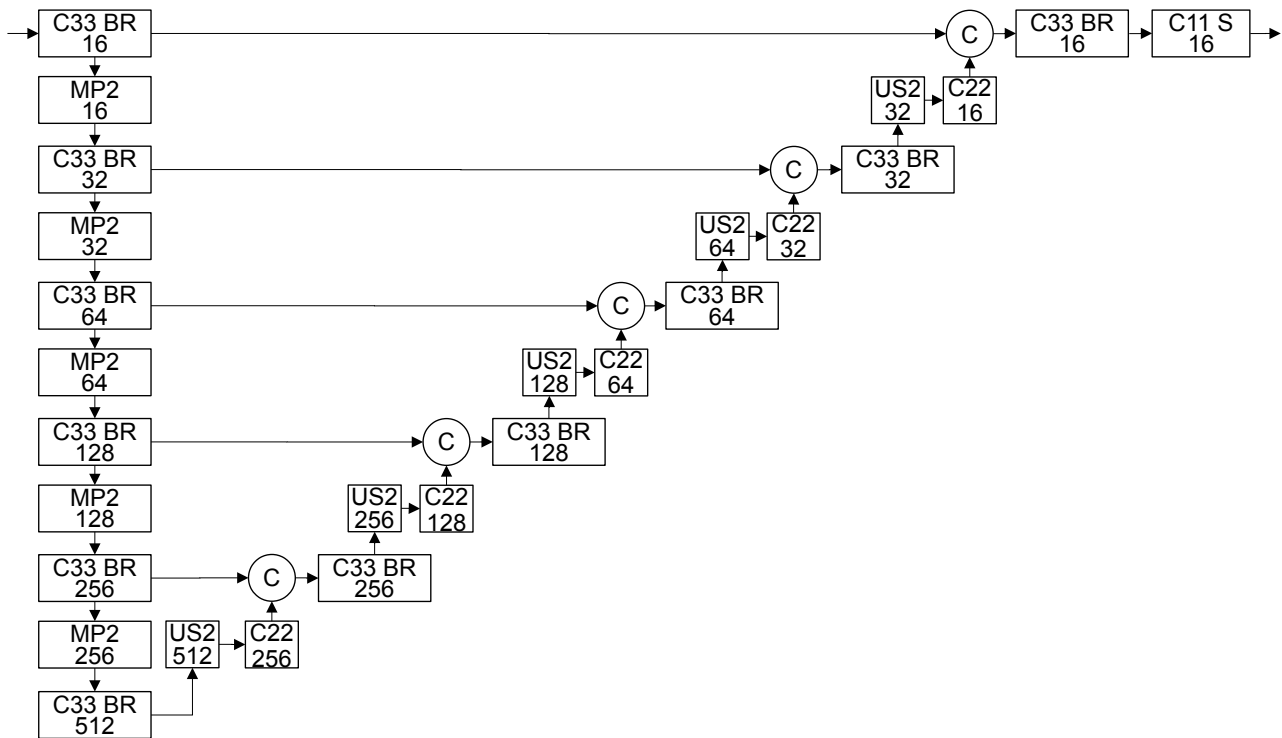


Рисунок 3 – Нейросетевая архитектура «Lanky U-Net»

«Lanky U-Net» обучалась сегментации облачности на панхроматических снимках аппаратуры «Геотон» КА «Ресурс-П», для которых можно выделить 3 уровня предварительной радиометрической обработки:

1) относительную радиометрическую коррекцию, устраняющую вариации чувствительности отдельных фотоэлементов, после выполнения которой сигнал во всех пикселях изображения может быть единообразно линейно преобразован в спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ), зарегистрированную на входном зрачке оптической системы;

2) абсолютную радиометрическую коррекцию, после выполнения которой сигнал пикселей изображения оказывается представлен в единицах СПЭЯ;

3) радиометрическую нормализацию с учетом освещенности, после выполнения которой сигнал во всех пикселях изображения оказывается представлен в виде коэффициентов спектральной яркости (КСЯ): отношений зарегистрированных СПЭЯ к СПЭЯ идеально отражающих ламбертовых поверхностей, находящихся в тех же условиях освещения, что и наблюдаемые объекты.

Проанализированы достоинства и недостатки каждого уровня радиометрической обработки. Также проведены экспериментальные исследования, показавшие, что, если на вход сети подается один уровень обработки, то результаты сегментации практически не зависят от уровня, а если подается сразу несколько уровней, то значение функции потерь на валидационной выборке снижается. Наименьшие потери наблюдаются при подаче на вход «Lanky U-Net» всех трех уровней, на втором месте по уровню потерь оказывается подача на вход уровней 1 и 2.

Архитектура «Lanky U-Net» позволяет выполнить обработку фрагмента изображения размером 512×512 пикселей. При обработке большие изображения разделяются на фрагменты с перекрытием в 256 пикселей, позволяющим избежать возникновения блочных артефактов на маске облачности.

Показано, как маска облачности может быть трансформирована в систему координат дифференциальной интерферограммы в случае синхронной оптической и радиолокационной съемки. Также высокая скорость сегментации делает предложенный алгоритм потенциально применимым на борту КА в задаче определения процента облачности и целесообразности выполнения радиолокационной интерферометрической съемки.

В рамках *седьмого положения* описываются три алгоритма объединения разнородной информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли.

Первый алгоритм предназначен для объединения интерферометрических и стереофотограмметрических цифровых моделей местности (ЦММ). Результат объединения формируется по данным интерферометрической ЦММ во всех пикселях, кроме тех, которые соответствуют искусственным высотным объектам. Для последних считается, что стереофотограмметрические данные точнее. Информация о расположении искусственных высотных объектов извлекается из электронных карт с уточнением на основе сопоставления объединяемых ЦММ. Заполнение пикселей с искусственными высотными объектами стереофотограмметрическими данными о высоте осуществляется с обеспечением бесшовной стыковки с интерферометрическими данными на основе построения корректирующей поверхности с интерполяцией по методу обратных взвешенных расстояний.

Второй алгоритм предназначен для перенесения наиболее важных объектов с радиолокационного изображения на оптическую подложку с целью облегчения их дешифрации. Результат объединения $\mathbf{s}_{объед}(m_k, n_k)$ фильтрованного радиолокационного изображения $s_{pф}(m_k, n_k)$ и геометрически совмещенного с ним оптического изображения $\mathbf{s}_{онт}(m_k, n_k)$ может быть вычислен как

$$\mathbf{s}_{объед}(m_k, n_k) = \begin{cases} \mathbf{s}_{онт}(m_k, n_k), & \text{ВЧ}\{s_{pф}(m_k, n_k)\} < \\ & < \theta_{важ} \text{НЧ}\{s_{pф}(m_k, n_k)\}, \\ \mathbf{s}_{онт}(m_k, n_k) + & \text{ВЧ}\{s_{pф}(m_k, n_k)\} \leq \\ + \frac{\text{ВЧ}\{s_{pф}(m_k, n_k)\} \cdot \text{НЧ}\{\mathbf{s}_{онт}(m_k, n_k)\}}{(\theta_{важ} + 1) \text{НЧ}\{s_{pф}(m_k, n_k)\}}, & \geq \theta_{важ} \text{НЧ}\{s_{pф}(m_k, n_k)\}, \end{cases} \quad (23)$$

где $\theta_{важ}$ – пороговый коэффициент, определяющий, насколько яркие объекты малой площади признаются важными; НЧ – низкочастотная составляющая сигнала, ВЧ – высокочастотная составляющая.

Третий алгоритм предназначен для раскраски радиолокационного изображения в естественные цвета, задаваемые спектрально-зональным снимком. Раскраска осуществляется в цветовом пространстве HSV с коррекцией насыщенности темных пикселей спектрально-зонального снимка и учетом логарифмического контрастирования при визуализации радиолокационных изображений:

$$S_{\text{раскрас}}(m_k, n_k) = \begin{cases} H_{\text{раскрас}}(m_k, n_k) = H_{\text{онт}}(m_k, n_k), \\ S_{\text{онт}}(m_k, n_k) \cdot \sqrt[p_{\text{раскрас}}]{\frac{V_{\text{онт}}(m_k, n_k)}{\theta_{V_{\text{раскрас}}}}}, & V_{\text{онт}}(m_k, n_k) \leq \theta_{V_{\text{раскрас}}}, \\ S_{\text{онт}}(m_k, n_k), & V_{\text{онт}}(m_k, n_k) > \theta_{V_{\text{раскрас}}}, \end{cases}$$

$$V_{\text{раскрас}}(m_k, n_k) = \ln(s_{\text{pf}}(m_k, n_k) + 1) - \ln(s_{\alpha_{\text{лев}}} + 1), \quad (24)$$

где $H_{\text{раскрас}}$, $S_{\text{раскрас}}$ и $V_{\text{раскрас}}$ – цвет, насыщенность и яркость результата раскраски; $\theta_{V_{\text{раскрас}}}$ – максимальное значение яркости на оптическом изображении $V_{\text{онт}}$, при котором выполняется коррекция насыщенности $S_{\text{онт}}$; параметр $p_{\text{раскрас}}$ определяет, насколько быстро начинает снижаться насыщенность по мере уменьшения яркости; $s_{\alpha_{\text{лев}}}$ – значение квантиля околонулевого уровня $\alpha_{\text{лев}}$, применяемого при контрастировании радиолокационного изображения. Результат раскраски переводится из HSV в цветовое пространство RGB с нелинейным преобразованием сигнала x цветового канала вида $\exp(x + \ln(s_{\alpha_{\text{лев}}} + 1) - 1)$. Если $s_{\text{pf}}(m_k, n_k) < s_{\alpha_{\text{лев}}}$, раскраска не выполняется. Пример раскраски приведен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Радиолокационное изображение в логарифмической шкале яркостей (слева), оптическое изображение (по центру) и результат раскраски (справа)

Экспериментальные исследования на натурной радиолокационной и оптико-электронной информации показали, что результаты объединения в соответствии с рассмотренными тремя алгоритмами имеют лучшие характеристики, чем исходная информация. Численные оценки приводятся в следующей главе.

Глава 6. Экспериментальное подтверждение эффективности методов и алгоритмов совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли

Эффективность алгоритмов в рамках Положения 1

Выполнены экспериментальные исследования с использованием нескольких десятков радиолокационных изображений от зарубежных КА ДЗЗ, показавшие, что предложенный алгоритм бортового сжатия радиоголограмм позволяет при заданной степени сжатия улучшить отношение сигнал-шум квантования на

синтезированных изображениях по сравнению с известным алгоритмом FDBAQ на 0,1–0,4 дБ. Это соответствует уменьшению на 1–5 % среднеквадратической ошибки отсчетов амплитуды сигнала на изображении.

Для оценки потерь при сжатии оптических изображений предложен интегральный показатель сходства яркостей, контраста и структуры изображений:

$$Q_{\text{якс}} = \frac{2\sigma_{ab} + 0,0009 L_{\text{я}}^2}{2\sigma_a \sigma_b + 0,0009 L_{\text{я}}^2} - \frac{|\mu_a - \mu_b|}{L_{\text{я}}} - \frac{6 \cdot |\sigma_a - \sigma_b|}{L_{\text{я}}}, \quad (25)$$

где a и b – изображения (исходное и сжатое), μ и σ^2 – математическое ожидание и дисперсия яркости пикселей соответствующего изображения, σ_{ab} – ковариация яркостей на изображениях, $L_{\text{я}}$ – ширина диапазона возможных значений яркости.

Проведены экспериментальные исследования с использованием 30 трехканальных изображений от КА «Канопус-В», показавшие, что предложенный алгоритм бортового адаптивного нейросетевого сжатия оптических изображений позволяет при заданной степени сжатия улучшить на 1,4–1,8 % значение показателя (25) по сравнению с известным детерминированным алгоритмом JPEG2000, начиная со степени сжатия 33. Исследования также показали, что предложенная архитектура сверточных нейронных сетей обеспечивает практически такие же значения показателей качества сжатого изображения, как и вычислительно гораздо более сложная архитектура на базе рекуррентных нейронных сетей.

Эффективность методов в рамках Положения 2

Выполнены исследования на основе внесения нескольких десятков различных ошибок в измерения астродатчиков, сопровождающих радиоголограмму от КА «COSMO-SkyMed», показавшие, что предложенный метод уточнения углов рысканья и тангажа позволяет в среднем на 28 % сократить число итераций, необходимое для получения точных оценок, по сравнению с известным подходом (Cumming I.G., Kavanagh P.F., Ito M.R. Resolving the Doppler ambiguity for spaceborne synthetic aperture radar // IGARSS. 1986. P. 1639–1643). Кроме того, предложенный метод стабильно позволяет получить положительные результаты в случае, когда ошибка знания относительного значения доплеровского центротида близка к половине частоты повторения зондирующих импульсов.

Проведены экспериментальные исследования с использованием 12 радиолокационных изображений от КА «TerraSAR-X», показавшие, что предложенный метод позволяет оценить угол крена со среднеквадратической ошибкой 1,5'.

Эффективность алгоритмов в рамках Положения 3

Выполнены экспериментальные исследования с использованием 20 радиолокационных изображений от КА «TerraSAR-X», данных сервиса Google Планета Земля и ЦМВ Copernicus DEM GLO-30, показавшие, что предложенный алгоритм в среднем позволяет обеспечить геодезическую привязку радиолокационного изображения относительно опорного оптического снимка со среднеквадратической ошибкой порядка 4 м.

Проведены экспериментальные исследования, показавшие, что предлагаемый алгоритм организации массовых координатных преобразований ускоряет геометрическую обработку в 10,5 раз по сравнению со строгими вычислениями.

Выполнены экспериментальные исследования, показавшие, что предложенный алгоритм позволяет примерно в 2 раза ускорить совмещение интерферометрической пары радиолокационных изображений с учетом высоты по сравнению с использованием упрощенной модели (Nitti D.O., Hanssen R.F., Refice A., Bovenga F., Nutricato R. Impact of DEM-assisted coregistration on high-resolution SAR interferometry // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2011. Vol. 49. No. 3. P. 1127–1143) и примерно в 11,7 раз по сравнению со строгими вычислениями.

Эффективность метода в рамках Положения 4

Выполнены экспериментальные исследования с использованием пар радиолокационных изображений от КА «TerraSAR-X», а также опорных ЦМБ ASTER GDEM и Alos World 3D 30, показавшие, что предложенный метод объединения радиолокационных изображений с нисходящего и восходящего витков орбиты позволяет в среднем в 6 раз сократить площадь геометрических искажений на результате объединения изображений без появления ложных границ объектов.

Эффективность метода в рамках Положения 5

Проведены экспериментальные исследования с использованием 10 интерферометрических пар радиолокационных изображений от зарубежных КА ДЗЗ, опорных ЦМБ ASTER GDEM и Alos World 3D 30, а также высокоточной стереофотограмметрической ЦММ, построенной по данным КА «Ресурс-П», показавшие, что предложенный метод обработки интерферограмм превосходит по среднему значению среднеквадратической ошибки высоты в 10,3 раза зарубежное программное обеспечение SARscape 4.3 и в 21,2–51 раз зарубежные программы GAMMA ISP, PCI Geomatica 2020 и SNAP 11.

Эффективность алгоритма в рамках Положения 6

Выполнены экспериментальные исследования с использованием 87 панхроматических изображений от аппаратуры «Геотон» КА «Ресурс-П», показавшие, что предложенный алгоритм нейросетевой сегментации облачности обеспечивает сопоставимое качество сегментации по сравнению с известной нейросетевой архитектурой «U-Net» (таблица 1) при в 22 раза меньшем объеме вычислений.

Таблица 1 – Показатели качества нейросетевой сегментации облачности

Показатель	По уровню 3				По уровням 1 и 2			
	U-Net		Lanky U-Net		U-Net		Lanky U-Net	
	$\delta_{сегм} = 0,13$	$\delta_{сегм} = 0,45$	$\delta_{сегм} = 0,13$	$\delta_{сегм} = 0,45$	$\delta_{сегм} = 0,13$	$\delta_{сегм} = 0,45$	$\delta_{сегм} = 0,13$	$\delta_{сегм} = 0,45$
$a_{сегм}, \%$	95,59	90,51	96,16	90,35	97,15	93,72	97,51	93,39
$J_{сегм}, \%$	71,32	79,48	73,73	78,90	80,50	86,27	82,30	85,45
$p_{сегм}, \%$	84,92	96,74	90,13	97,97	90,70	98,09	94,75	98,96
$F_{1сегм}, \%$	83,26	88,57	84,88	88,20	89,20	92,63	90,29	92,16
$\phi_{сегм}, \%$	80,75	81,41	82,88	81,32	87,57	87,60	88,99	87,11
$\alpha_{сегм}, \%$	2,25		1,36		1,40		0,74	
$\beta_{сегм}, \%$	18,33		19,79		12,26		13,77	

В таблице 1 использованы следующие обозначения: $\delta_{сегм}$ – средняя доля облачности, $J_{сегм}$ – мера Жаккара, $p_{сегм}$ – показатель точности (precision) обнаружения объекта, $F_{1сегм}$ – F_1 -мера, $\phi_{сегм}$ – коэффициент корреляции Мэттью, $\alpha_{сегм}$ – вероятность возникновения ошибки первого рода (ложного выделения), $\beta_{сегм}$ – вероятность возникновения ошибки второго рода (пропуска объекта).

Эффективность алгоритмов в рамках Положения 7

Проведены экспериментальные исследования с использованием ЦММ Copernicus DEM GLO-30 и Alos World 3D 30, а также высокоточной стереофотограмметрической ЦММ, построенной по данным КА «Ресурс-П», показавшие, что предложенный алгоритм объединения позволяет на 3,4 % уменьшить среднеквадратическую ошибку высоты по сравнению с лучшей из исходных ЦММ.

Эксперименты с использованием 10 радиолокационных изображений от зарубежных КА ДЗЗ и данных сервиса Google Планета Земля, показали, что предложенный алгоритм объединения позволяет на 9,7 % уменьшить потери информативности по сравнению с лучшим из исходных изображений.

Реализация методов и алгоритмов. Предложенные методы и алгоритмы реализованы на языке C++ в виде динамически загружаемых модулей в составе специального программного обеспечения обработки данных от КА «Обзор-Р» № 1 и № 2, а также экспериментального программного обеспечения проектирования перспективных космических систем ДЗЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен системный анализ проблемы совместной обработки информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ. Выявлены проблемные вопросы такой обработки. Определены перспективные направления научных исследований.

2. Разработаны алгоритмы бортового сжатия радиоголограмм и оптических изображений земной поверхности с потерями на основе блочно-адаптивного квантования и энтропийного кодирования (для радиоголограмм) и нейросетевых моделей (для оптических изображений), позволяющие при заданной степени сжатия уменьшить уровень искажений до 5 % по сравнению с известными детерминированными алгоритмами.

3. Предложены методы уточнения угловой ориентации космического аппарата с совместным использованием измерений оптико-электронных приборов и результатов амплитудного анализа радиолокационных изображений в ходе их первичной обработки, позволяющие оценить угол крена со среднеквадратической ошибкой 1,5' и на 28 % сократить временные затраты на уточнение углов рысканья и тангажа.

4. Созданы алгоритмы геодезической привязки и геометрической обработки радиолокационной информации на основе ее совмещения с опорными оптическими изображениями, позволяющие повысить точность оценки координат объектов в среднем до 4 м и значительно сократить время формирования стандартных информационных продуктов.

5. Разработан метод объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики и использования низкодетальной высотной информации от оптико-электронных систем, позволяющий в среднем в 6 раз уменьшить площадь геометрических искажений без образования ложных границ.

6. Предложен метод высокоточной обработки интерферометрических изображений с целью получения цифровых моделей высот на основе анализа сюжета интерферометрического изображения и привлечения низкодетальной высотной информации от оптико-электронных систем наблюдения Земли, позволяющий в среднем в 10 раз уменьшить среднеквадратическую ошибку определения высот по сравнению с лучшими зарубежными аналогами.

7. Создан алгоритм высокоскоростной нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных интерферограммах, позволяющий примерно в 22 раза сократить объем вычислений по сравнению с известной архитектурой «U-Net» при сохранении высокой точности сегментации.

8. Разработаны алгоритмы объединения разнородной информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли, позволяющие примерно на 3 % уменьшить среднеквадратическую ошибку высоты по сравнению с лучшей из объединяемых цифровых моделей местности, примерно на 10 % снизить потери информативности объединяемых изображений и представить радиолокационные изображения в естественных цветах.

9. На основе предложенных методов и алгоритмов создаются средства наземной обработки данных от отечественных радиолокационных КА ДЗЗ «Обзор-Р» № 1 и № 2, а также разработано экспериментальное программное обеспечение проектирования средств бортовой обработки в перспективных КА ДЗЗ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Ниже приводятся основные работы, в которых в наибольшей степени раскрываются положения (методы и алгоритмы), выносимые на защиту. Полный перечень публикаций приведен в диссертации.

Статьи в изданиях из перечня ВАК (категории K1 и K2) и Белого списка

1. Ушенкин, В.А. Применение нечетких мер подобия в задаче совмещения изображений поверхности Земли / Г.Н. Мятлов, Р.В. Тишкин, В.А. Ушенкин, А.А. Юдаков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 44. С. 18–26. (K2)

2. Ушенкин, В.А. Применение нечетких масок в задаче координатной привязки изображений от геостационарных космических систем наблюдений Земли по электронным картам / Л.А. Демидова, Г.Н. Мятлов, Р.В. Тишкин, В.А. Ушенкин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 49. С. 3–10. (K2)

3. Ушенкин, В.А. Совмещение высокодетальных изображений с использованием опорной цифровой модели рельефа при интерферометрической обработке ра-

диоолокационной информации / Н.А. Егошкин, В.А. Ушенкин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 51. С. 72–79. (K2)

4. Ушенкин, В.А. Интерферометрическая обработка радиолокационной информации на основе комбинации методов развертывания фазы / Н.А. Егошкин, В.А. Ушенкин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54-2. С. 21–31. (K2)

5. Ушенкин, В.А. Формирование цифровых моделей рельефа на основе высокоточного развертывания фазы интерферограмм от систем радиолокационной съемки Земли / Н.А. Егошкин, В.В. Еремеев, А.Э. Москвитин, В.А. Ушенкин // Радиотехника. 2016. №11. С. 120–127. (K1)

6. Ушенкин, В.А. Уточнение пространственной базы при космической би-статической радиолокационной съемке Земли по сигналу интерферограммы / Н.А. Егошкин, В.А. Ушенкин // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 3. С. 42–48. (K1)

7. Ушенкин, В.А. Использование априорной информации при интерферометрической обработке высокодетаальной радиолокационной информации / В.А. Ушенкин, Н.А. Егошкин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15. № 2. С. 208–219. (K1)

8. Ушенкин, В.А. Комплексирование цифровых моделей рельефа с целью повышения точности опорной информации о высоте объектов земной поверхности / Н.А. Егошкин, В.А. Ушенкин // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 1. С. 13–17. (K1)

9. Ушенкин, В.А. Проблемные вопросы обработки данных от космических систем гиперспектральной и радиолокационной съемки Земли / В.В. Еремеев, Н.А. Егошкин, А.А. Макаренков, А.Э. Москвитин, В.А. Ушенкин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 60. С. 54–64. (K2)

10. Ушенкин, В.А. Комплексирование радиолокационных изображений от восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики / А.Э. Москвитин, В.А. Ушенкин // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 10–15. (K1)

11. Ушенкин, В.А. Эффективная организация массовых координатных преобразований при геометрической обработке радиолокационных изображений / Н.А. Егошкин, В.А. Ушенкин // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 16–20. (K1)

12. Ушенкин, В.А. Математическая модель синтеза радиолокационных изображений дециметрового разрешения из радиоголограмм от космических РСА / В.А. Ушенкин // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 21–25. (K1)

13. Ушенкин, В.А. Комплексирование радиолокационных и оптических изображений от космических систем дистанционного зондирования Земли / А.Э. Москвитин, В.А. Ушенкин // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 5-2. С. 183–191. (K1)

14. Ушенкин, В.А. Алгоритм сжатия радиоголограмм на борту космических аппаратов с РСА / С.И. Гусев, В.В. Еремеев, В.А. Ушенкин, А.Н. Черный // Цифровая обработка сигналов. 2022. № 1. С. 3–7. (K1)

15. Ушенкин, В.А. Сравнительный анализ пригодности поляриметрических декомпозиций изображений о космических систем радиолокационного на-

блюдения Земли в задаче мониторинга лесного покрова / В.А. Ушенкин, А.В. Соловьев // Цифровая обработка сигналов. 2022. № 1. С. 8–13. (К1)

16. Ушенкин, В.А. Адаптивное нейросетевое сжатие мультиспектральных космических изображений поверхности Земли / В.А. Ушенкин // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 3. С. 18–26. (К1)

17. Ушенкин, В.А. Алгоритм и программный комплекс высокоскоростной нейросетевой сегментации облачности на панхроматических изображениях от космических аппаратов «Ресурс-П» / А.Э. Москвитин, В.А. Ушенкин, С.А. Ларюков // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 3. С. 8–17. (К1)

18. Ушенкин, В.А. Улучшение технологий искусственного интеллекта при обработке материалов наблюдения Земли на основе системного анализа сквозного информационного тракта / В.В. Еремеев, Н.А. Егошкин, А.А. Макаренков, В.А. Ушенкин, О.В. Постыляков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 144–154. (К1)

19. Ушенкин, В.А. Оценивание доплеровского центроида при первичной обработке космических радиоголограмм маршрутного режима съемки путем амплитудного анализа / В.А. Ушенкин // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 3. С. 31–39. (К1)

20. Ушенкин, В.А. Комплексирование интерферометрической и стереофотограмметрической цифровых моделей местности GLO-30 и AW3D30 / В.А. Ушенкин, С.А. Ларюков // Цифровая обработка сигналов. 2024. №3. С. 40–43. (К1)

21. Ушенкин, В.А. Метод высокоточной обработки топографических интерферометрических изображений с привлечением низкодетальной стереофотограмметрической информации от оптико-электронных систем ДЗЗ / В.А. Ушенкин // Цифровая обработка сигналов. 2025. № 1. С. 59–66. (К1)

22. Ушенкин, В.А. Технологии высокоточной автоматической привязки и высокоуровневой обработки радиолокационных космических изображений / В.А. Ушенкин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24. № 2. С. 74–86. (К1)

23. Ушенкин, В.А. Статистическая радиометрическая коррекция космических РСА-изображений, полученных в маршрутном режиме съемки / В.А. Ушенкин // Цифровая обработка сигналов. 2025. № 3. С. 3–9. (К1)

Патент и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

24. Ушенкин, В.А. Программа расчета радиометрического разрешения радиолокационных изображений: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015619221 от 27.08.2015 / П.А. Князьков, В.А. Ушенкин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». – № 2015616013; заявл. 03.07.2015; опубл. 20.09.2015.

25. Ушенкин, В.А. Способ развертывания фазы при интерферометрической обработке информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли: пат. 2612322 РФ: МПК G01S 13/90 / Н.А. Егошкин, В.В. Еремеев, А.Э. Москвитин, В.А. Ушенкин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». – № 2016113159; заявл. 07.04.2016; опубл. 07.03.2017, Бюл. № 7.

26. Ушенкин, В.А. Программа высокоскоростного субпиксельного совмещения интерферометрической пары высокодетальных изображений от космических

систем ДЗЗ: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017617929 от 17.07.2017 / В.А. Ушенкин, Н.А. Егошкин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». – № 2017615063; заявл. 30.05.2017; опубл. 17.07.2017.

27. Ушенкин, В.А. Программа высокоточного развертывания фазы по результатам выявления фазовых разрывов на интерферометрических изображениях от космических систем ДЗЗ: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017618131 от 24.07.2017 / В.А. Ушенкин, Н.А. Егошкин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». – № 2017615286; заявл. 30.05.2017; опубл. 24.07.2017.

28. Ушенкин, В.А. Программа уточнения перпендикулярной пространственной базы и фазы плоского рельефа по интерферометрическому изображению от космических систем ДЗЗ: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017618206 от 25.07.2017 / В.А. Ушенкин, Н.А. Егошкин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». – № 2017615039; заявл. 30.05.2017; опубл. 25.07.2017.

29. Ушенкин, В.А. Программа выявления фазовых разрывов на интерферометрических изображениях от космических систем ДЗЗ: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017618213 от 25.07.2017 / В.А. Ушенкин, Н.А. Егошкин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». – № 2017615037; заявл. 30.05.2017; опубл. 25.07.2017.

Коллективные монографии

30. Ушенкин, В.А. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли / Н.А. Егошкин, В.В. Еремеев, А.Э. Москвитин, В.А. Ушенкин. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. 320 с.

31. Ушенкин, В.А. Повышение информативности космических изображений Земли / Н.А. Егошкин, В.В. Еремеев, Е.П. Козлов, А.Е. Кузнецов, А.А. Макаренков, А.Э. Москвитин, О.А. Пресняков, В.А. Ушенкин; под. ред. В.В. Еремеева. Москва: КУРС, 2022. 368 с.

Учебные пособия

32. Ушенкин, В.А. Геоинформатика. Обработка аэрокосмических изображений Земли / С.И. Гусев, В.В. Еремеев, А.Е. Кузнецов, С.М. Ларионов, А.А. Макаренков, В.А. Ушенкин; под. ред. В.В. Еремеева. М.: Курс, 2021. 312 с.

33. Ушенкин, В.А. Цифровая обработка данных радиолокационного зондирования Земли из космоса / С.И. Гусев, Н.А. Егошкин, В.В. Еремеев, А.Е. Кузнецов, А.Э. Москвитин, В.А. Ушенкин; под. ред. В.В. Еремеева, В.А. Ушенкина. М.: Курс, 2021. 248 с.

Ушенкин Виктор Андреевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ОТ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО
И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Бумага офисная. Печать цифровая.
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1