ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук профессора Кострова Виктора Васильевича на диссертацию **Ушенкина Виктора Андреевича «Методы и алгоритмы совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»

Актуальность темы диссертации

В настоящее время наблюдается бурное развитие методов и средств дистанционного зондирования поверхности Земли (ДЗЗ) космического базирования. Основными причинами данной тенденции являются значительное улучшение тактико-технических характеристик средств наблюдения, расширение области их применения. Практически все новые системы используют цифровые методы обработки сигналов, что позволяет реализовать потенциальные возможности оптических и радиосистем или приблизиться к ним. За последние 20...30 лет значительно (на порядок и более) возросла разрешающая способность средств ДЗЗ. Современные космические средства ДЗЗ могут иметь максимальное разрешение порядка 0,25...0,5 м, что позволяет обнаруживать и распознавать не только крупные цели, но и большое число малоразмерных целей. Системы ДЗЗ обеспечивают потребителей многообразной и ценной информацией, которая может быть успешно использована для решения прикладных задач на новом, ранее не доступном качественном уровне.

Космические системы ДЗЗ обладают высокими показателями по таким параметрам как зона обзора, производительность и экономичность, но это достигается за счёт узкой специализации систем и ухудшения параметра «комплексность», снижения точности измерений и пространственного разрешения. В космической отрасли исторически первыми для целей ДЗЗ стали использоваться оптико-электронные системы (ОЭС) съемки. Целевая аппаратура наблюдения на борту космического аппарата (КА) в этом случае традиционно представлена средствами различных диапазонов и пространственного разрешения: панхроматическим, мультиспектральным, гиперспектральным или инфракрасным каналом низкого, высокого или сверхвысокого разрешения. При относительной простоте реализации оптические средства имеют ряд существенных недостатков, выражающихся в зависимости от погоды и времени суток, в ограниченной полосе обзора.

Радиолокационные средства, использующие технологию синтезирования апертуры антенны (РСА), позволяют всепогодно и круглосуточно получать изображения, обнаруживать движущиеся, а также скрытые и подповерхностные объекты, регистрировать сверхмалые смещения и решать ряд других задач, недоступных для оптико-электронных систем. Для территории России применение РСА является особенно востребованным и необходимым сразу по нескольким причинам. Во-первых, облачные структуры затеняют до 50-80% поверхности Земли и делают полученные с помощью ОЭС фотоснимки непригодными для использования. Во-вторых, часть территории России находится за полярным кругом, имеет слабую освещённость, которая к тому же зависит от времени года, что существенно снижает качество получаемого фотоматериала. В настоящее время активно формируется отечественная спутниковая группировка радиолокационного наблюдения Земли из космоса, на орбите уже функционируют первые космические комплексы «Кондор-ФКА», «Обзор-Р» и планируется создание и

вывод еще 3-х КА каждого вида. Несколько перспективных проектов находятся в завершающей стадии.

Методы получения радиолокационных изображений являются более разнообразными по сравнению с методами формирования оптических изображений, что усложняет их визуальное восприятие и требуют для дешифрации определенной подготовки. Также при радиолокационном наблюдении возникают различные неоднозначности: по азимуту, по дальности, по фазе сигнала, которые снижают качество синтезируемых изображений и получаемых на их основе информационных продуктов.

Сегодня технологии ДЗЗ эффективно используются для решения различных социально-экономических, экологических, научных и разнообразных военных задач. В связи с этим системный анализ средств ДЗЗ, совершенствование методов и алгоритмов обработки информации являются одним из важнейших и востребованных направлений развития ОЭС и РСА космического базирования. Одним из направлений решения данных задач является совместное использование и обработка информации космических ОЭС и РСА. Комплексирование информации от датчиков, имеющих различную природу, рациональная совместная обработка информации с использованием цифровых вычислительных устройств давно используется для повышения точности, надежности и информативности измерений, например, в авионике. Поэтому естественно ожидать, что данные технологии в применении к ОЭС и РСА космического базирования дадут положительный эффект и имеют большие перспективы.

Представленная диссертация Ушенкина В.А. как раз посвящена исследованию совместной обработки результатов радиолокационного наблюдения и данных от оптико-электронных систем, что, безусловно, очень актуально. Диссертационная работа охватывает широкий круг вопросов и нацелена в первую очередь на парирование недостатков радиолокационного наблюдения, улучшения радиометрических и геометрических характеристик получаемых изображений, увеличения скорости обработки входной информации и выдачи информационных продуктов.

Структура и основное содержание диссертации

Диссертация содержит 403 страницы и состоит из введения, шести разделов, заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы составляет 355 страниц основного текста, включая 68 рисунков, 18 таблиц, библиографию из 330 наименований, в том числе 100 работ автора, отражающих существо диссертации. Приложение к диссертации размещено на 9 страницах. В автореферате приведены 33 основные публикации по теме диссертации.

Целью диссертационной работы автор считает «улучшение радиометрического и геометрического качества и увеличение скорости формирования информационных продуктов космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли за счет совместной обработки информации от таких систем» (с. 4ар – автореферата, с. 13д – диссертации).

Для достижения сформулированной цели автор решил широкий круг задач с использованием разнообразных методов и подходов. Основное содержание диссертации составляют следующие направления работ. В первой – пятой главах дается решение задач, поставленных для достижения цели диссертационной работы, и теоретическое обоснование вынесенных на защиту новых научных положений. Сюда входят проведение системного анализа проблемы совместной обработки информации от радиолокационных и оптико-электронных систем ДЗЗ космического базирования;

разработка методов и алгоритмов бортового сжатия радиоголограмм и оптической информации и уточнения угловых измерений оптико-электронных приборов по результатам анализа радиолокационных данных; разработка методов и алгоритмов геодезической привязки, геометрической обработки и объединения радиолокационных изображений с привлечением оптических данных; разработка метода обработки интерферометрических РСА изображений с привлечением информации от ОЭС; разработка алгоритмов объединения информации от РСА и ОЭС космического базирования для повышения информативности и улучшения изобразительных свойств изображений. В 6-ой главе приводятся результаты экспериментального подтверждения эффективности предложенных методов и алгоритмов совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. В заключении, состоящем из 9 развернутых пунктов, подробно перечислены основные достигнутые в диссертации научные и практические результаты. Приложение содержит акты использования и внедрения результатов диссертационной работы в промышленности и в учебном процессе.

Диссертация обладает внутренним единством: материалы отдельных разделов тесно связаны между собой и объединены общей постановкой задачи, этапами обработки изображений, а также подходами и методами исследования.

Научная новизна

В диссертации предложены новые методы и алгоритмы совместной обработки информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ. Они позволяют улучшить радиометрическое и геометрическое качество выходных информационных продуктов, а также повысить скорость их формирования. Научная новизна результатов диссертационных исследований и предлагаемых решений заключается в следующем:

1) выполнен системный анализ существующих методов и алгоритмов бортовой и наземной обработки информации радиолокационных и оптических комплексов ДЗЗ космического базирования, на основании которого определены актуальность и направления новых научных исследований;

2) разработаны алгоритмы сжатия радиоголограмм (на основе блочно-адаптивного квантования и энтропийного кодирования) и оптических изображений (на основе нейросетевых моделей) на борту КА, что позволяет при заданной степени сжатия уменьшить уровень искажений;

3) разработаны методы уточнения угловой ориентации КА с совместным использованием измерений оптико-электронных приборов и результатов амплитудного анализа радиолокационных изображений (РЛИ), которые позволяют сократить временные затраты на уточнение углов рысканья и тангажа и оценить угол крена, тем самым повысить качество синтеза РЛИ;

4) на основе методологии совмещения РЛИ с опорными оптическими изображениями разработаны алгоритмы геодезической привязки и геометрической обработки, которые позволяют повысить точность оценки координат объектов и значительно сократить время формирования стандартных информационных продуктов;

5) на основе нечеткой логики и использования низкодетальной высотной информации от ОЭС разработан метод объединения РЛИ с восходящего и нисходящего витков орбиты, который позволяет уменьшить площадь геометрических искажений без образования ложных границ;

6) разработан метод высокоточной обработки интерферометрических изображений с целью получения цифровых моделей высот на основе анализа сюжета интерферометрического изображения и привлечения низкодетальной высотной информации от ОЭС наблюдения Земли, позволяющий уменьшить среднеквадратическую ошибку определения высот по сравнению с лучшими зарубежными аналогами;

7) разработан алгоритм высокоскоростной нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных интерферограммах и РЛИ;

8) синтезированы алгоритмы комплексирования разнородной информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ, которые используют особенности каждой системы для повышения информативности информационных продуктов.

Новизна перечисленных научных результатов подтверждается полученными свидетельствами на программы для ЭВМ и патентом на изобретение.

Особый интерес, на мой взгляд, представляют новые результаты по сжатию радиоголограмм на борту КА. Исследование комбинации блочно-адаптивного квантования и энтропийного кодирования показало возможность снижения искажений при сжатии сигналов с потерями в РСА космического базирования. Результаты подобных исследований представляют самостоятельный интерес для совершенствования техники РСА. Значительный интерес представляют также результаты по комплексированию интерферометрических данных от РСА и низкодетальной высотной информации от ОЭС для получения цифровых моделей высот. Следует заметить, что интерферометрический режим съемки является одним из самых сложных в системах с использованием РСА, поэтому любой прогресс в качестве получаемого результата имеет большую ценность. Совместная обработка данных РСА и ОЭС в несколько раз увеличивает точность измерения высот, что создает предпосылки создания высококачественных глобальных карт рельефа местности. Можно также прогнозировать, что радиометрическая и фазометрическая коррекция интерферометрических РЛИ по результатам детектирования облачности средствами ОЭС позволит повысить точность измерения смещений техногенных объектов.

Достоверность научных положений определяется:

– корректным использованием методов системного анализа, цифровой обработки сигналов, оптимизации, линейной алгебры, математической статистики, теории графов и искусственного интеллекта;

– математическим и имитационным моделированием;

– экспериментальными исследованиями на статистически представительной выборке натурных данных от отечественных и зарубежных космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли;

– сопоставлением с известными аналогами;

– практической реализацией предложенных решений в комплексах обработки информации, получивших внедрение и использование в НИОКР ведущих предприятий ракетно-космической отрасли: АО «РКЦ «Прогресс», АО «ЦНИИмаш», АО «Российские космические системы», НИИ космических систем имени А.А. Максимова – филиале ГКНПЦ им. М.В. Хруничева.

Обоснованность научных положений определяется и подтверждается положительными результатами математического моделирования и экспериментальных исследований, сходимостью результатов в частных случаях с известными результатами, проверенными временем, а также апробацией на профильных международных и всероссийских конференциях.

Практическая ценность

Практическая ценность результатов диссертационной работы обусловлена тем, что созданные на их основе программные средства обработки повышают качество и эффективность использования космических снимков. Предложенные бортовые алгоритмы сжатия радиоголограмм и оптических изображений позволяют при заданной степени сжатия уменьшить уровень искажений до 5% по сравнению с известными детерминированными алгоритмами; методы уточнения угловой ориентации КА позволяют оценить угол крена со среднеквадратической ошибкой порядка 1,5' (в десятки раз меньше ширины диаграммы направленности антенны), тем самым повысить качество синтеза радиолокационных изображений (РЛИ); использование методологии совмещения РЛИ с оптическими изображениями дает повышение точности оценки координат объектов до 4 м и значительно сокращает время формирования информационных продуктов; метод объединения РЛИ с восходящего и нисходящего витков орбиты позволяет в 6 раз уменьшить площадь геометрических искажений без образования ложных границ; метод интерферометрической обработки с целью получения цифровых моделей высот позволяет в 10 раз уменьшить ошибку; алгоритм нейросетевой сегментации облачности позволяет в 22 раза сократить объем вычислений по сравнению с известными при сохранении высокой точности сегментации; алгоритмы объединения радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли позволяют 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. Новые теоретические и практические результаты, полученные в диссертации, использованы в учебном процессе РГРТУ.

Практическая ценность работы подтверждается Актами о внедрении и использовании результатов диссертации в промышленности и учебном процессе (Приложение к диссертации, с 395-403).

Публикации

Опубликованные работы отражают основные разделы диссертации. Результаты диссертации достаточно полно опубликованы в 33 работах: 23 статьях в изданиях по списку ВАК категорий К1 и К2, 1 патенте на изобретение, 5 свидетельствах о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 коллективных монографиях, 2 учебных пособиях. Результаты диссертации прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях (опубликовано 65 материалов и тезисов докладов). Также изданы 2 статьи в межвузовских сборниках научных работ.

Достоинства работы

Диссертационная работа В.А. Ушенкина на тему «Методы и алгоритмы совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-

электронного наблюдения Земли» выполнена на высоком научно-техническом уровне, написана четким, технически грамотным языком и качественно оформлена. Ее тема и содержание соответствуют п.п. 4, 5, 12 «Паспорта научной специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика». Содержание представленного автореферата в целом соответствует содержанию, основным идеям и выводам диссертации. Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями государственных стандартов России.

Недостатки работы

Автору не удалось избежать ряда недостатков. К числу наиболее существенных замечаний по диссертации и автореферату можно отнести следующие.

1. При системном анализе алгоритмов и технологий формирования изображений из радиоголограмм (с.8,9ар, п. 1.2.3д) недостаточное внимание уделено проблемам миграции сигналов по каналам дальности и возникновению неоднозначности по дальности.
2. Показано, что предлагаемый алгоритм сжатия радиоголограмм на 0,1…0,4 дБ превосходит FDBAQ по отношению сигнал-шум (с.99д) в базовом режиме съемки. Не ясно, какие результаты будут в других режимах, например, Staring Spotlight, TOPS, ScanSAR и т.п.
3. Предложенный в п. 2.3д (с. 12-14ар) метод уточнения углов рысканья и тангажа применим только в маршрутном (полосовом) и прожекторном режимах радиолокационного наблюдения, поскольку требует разделения на две неперекрывающиеся части полной апертуры синтеза. В то же время вопросы уточнения углов рысканья и тангажа при широкозахватном режиме радиолокационного наблюдения, когда конкретная часть апертуры, используемая для синтеза, зависит от азимутального положения наблюдаемого объекта, в диссертации не рассмотрены.
4. Предложенный в п. 3.4д (с.17,18ар) метод объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты рассчитан только на два исходных изображения. При этом возможность объединения бóльшего количества изображений в диссертации не рассмотрена.
5. В диссертации не рассмотрено влияние на точность интерферометрической обработки состояния ионосферы Земли, характерное для радиолокационной съемки в дециметровом диапазоне длин волн (гл. 4, гл.6).
6. Алгоритмы развертывания и фильтрации фазы ориентированы на устранение элементарных разрывов фазы и выявления длинных линий разрыва фазы (гл.4). Не ясно, как они будут работать в условиях кольцевых разрывов фазы.

В тексте диссертации встречаются нечеткие высказывания, стилистические и технические погрешности, например:

- «поскольку накопление является когерентным, то оценка, что средний квадрат искажений уменьшается в N раз, не может быть применена» (с.92д); «сильная фильтрация» (с.208д); «чтобы не вносить сильные искажения…, размывать сигнал необходимо сильнее» (с.214д); не ясно, какие значения σ_{pm} и σ_{pn} использовались при расчетах (с. 313д);

- пояснения символов в формулах часто разнесены в разных главах, например, в формуле (2.8) на с.95д расшифровка P_k, N_{yp} дана на с. 42д; целесообразно было бы привести единый список обозначений.

Указанные недостатки не оказывают существенного влияния на положительную оценку работы в целом.

Заключение

Диссертация В.А. Ушенкина является завершенной научно-квалификационной работой и отвечает требованиям п.п. 9,10,11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (ред. 16.10.2024 г.) «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям. В диссертации представлены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны – на федеральном, отраслевом и региональном уровнях. Проведенный системный анализ проблемы совместной обработки информации от космических радиолокационных и оптико-электронных систем, предложенные новые методы и алгоритмы обработки информации вносят существенный вклад в теорию и практику системотехники и комплексов ДЗЗ космического базирования.

В связи с вышеизложенным, считаю, что автор диссертации – **Ушенкин Виктор Андреевич** – заслуживает присуждения ученой степени *доктора технических наук* по специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Официальный оппонент
профессор кафедры радиотехники,
доктор технических наук, профессор — Костров Виктор Васильевич

Подпись В.В. Кострова заверяю.
Ученый секретарь Ученого совета — Полулях Ольга Николаевна

«01» 06 2026 г.

Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
602264, Владимирская область, г. Муром, ул. Орловская, д.23
Тел.: 8 (49234) 77-1-01, факс/тел.: 8 (49234) 77-1-28
Сайт организации: https://www.mivlgu.ru/
E-mail: oid@mivlgu.ru

Костров Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники факультета информационных технологий и радиоэлектроники (ФИТР).
E-mail: kostrov.46@mail.ru Тел. раб. 8-(49234) 77-2-32

С отзывом ознакомлен 08.06.2026 г.