

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Сосновского Андрея Васильевича

«ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭТАПОВ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.16. Радиолокация и радионавигация

Актуальность темы

Космическая радиолокационная интерферометрия является, пожалуй, наиболее эффективным инструментом формирования высотной основы топографических карт, мониторинга геологических, гидрологических, гляциологических процессов и состояния транспортных коммуникаций. К основным задачам оценки интерферометрической разности фаз относятся фильтрация фазовых шумов и устранение круговой фазовой неоднозначности – развертывание фазы. Задача развертывания фазы часто не имеет однозначного решения, поэтому поиск эффективного с вычислительной точки зрения способа восстановления абсолютной интерферометрической разности фаз с заданной точностью продолжается и в настоящее время.

В этой связи диссертационная работа Сосновского А.В., посвящённая исследованию и разработке алгоритмов интерферометрической обработки радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли из космоса, является актуальной.

Краткое содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, содержит 143 страницы текста, 5 таблиц и 54 рисунка. Материал диссертации изложен ясно и достаточно подробно, что позволяет получить полное представление о новизне и достоверности защищаемых положений.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, определены объект и предмет исследований. Здесь же приводятся положения, выносимые на защиту и определяющие научную новизну и практическую ценность результатов исследований, приводятся сведения об апробации работы, публикациях автора и внедрении результатов исследований.

В **первой главе** производится аналитический обзор принципов, этапов и проблем, связанных с реализацией интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны (РСА) при построении и оценке точности цифровых моделей рельефа (ЦМР) земной поверхности. Рассмотрены основные источники ошибок определения значений абсолютной фазы и высоты ЦМР и показано, что значительный вклад в ошибку вносят декорреляция отражённых сигналов и неоднозначность решения задачи развертывания фазы. Здесь же показано, что существующие методики экспериментальной оценки точности ЦМР предполагают полное завершение интерферометрической обработки, что существенно затрудняет оценку

эффективности выполнения основных этапов интерферометрической обработки, в частности – оценку эффективности развёртывания фазы.

Вторая глава посвящена синтезу алгоритма развёртывания фазы с использованием математической модели интерферометрической разности фаз и ее разрывов, записанной автором в виде функции комплексного переменного с единичной амплитудой (далее – комплексная интерферограмма). Разрывы фазы являются комбинаций нулей и полюсов этой функции. Алгоритм представляет собой итерационную процедуру умножения комплексной интерферограммы на встречное вихревое поле фазы и суммирование приращений аргумента произведения. В целях снижения ошибок «интегрирования фазового градиента» вычисление встречного вихревого поля сопровождается удалением из него низкочастотной составляющей.

В главе показано, что вычислительная сложность алгоритма, реализующего данный метод, является почти линейной, что позволяет использовать его для обработки интерферограмм больших размеров. Описана реализация алгоритма на параллельных вычислительных устройствах.

В **третьей главе** сформулированы предложенные автором методики оценивания эффективности основных этапов интерферометрической обработки: методика оценивания точности высот ЦМР и абсолютных фаз, методика оценивания эффективности подавления фазового шума, методика сравнения способов оценивания когерентности интерферометрических пар. Показано, что методики позволяют получать характеристики точности высот ЦМР или фаз (абсолютных или интерферометрических) при различных значениях параметров алгоритмов обработки и производить анализ эффективности существующих и вновь разрабатываемых алгоритмов интерферометрической обработки по критерию минимума среднеквадратичного отклонения.

В **четвёртой главе** с использованием предложенных выше методик производится сравнительная оценка точности результатов применения различных алгоритмов на отдельных этапах интерферометрической обработки (фильтрации фазового шума, развёртывании фазы), а также предлагается модификация самой технологии интерферометрической обработки, в которой развёртывание фазы и фильтрация фазового шума осуществляются независимо и параллельно, а затем производится пост-фильтрация остаточной интерферограммы, после чего результаты операций суммируются. В главе показано, что предложенный алгоритм развёртывания фазы в связке с модификацией технологии интерферометрической обработки позволяют повысить точность измерения высот и абсолютных фаз на $20 \div 25$ % по сравнению с известными алгоритмами.

В **заключении** кратко сформулированы основные результаты работы. **Библиографический список** содержит 153 наименования.

Новизна научных результатов и выводов, сформулированных в диссертационной работе

К основным новым результатам диссертационной работы следует отнести:

– разработку нового метода развёртывания фазы и реализующего его рекурсивного алгоритма, основанных на прямом устранении разрывов фазы с помощью встречного

вихревого поля фазы. Алгоритм, в отличие от существующих, имеет практически линейную вычислительную сложность и допускает распараллеливание вычислений;

- создание методик экспериментального оценивания эффективности основных этапов интерферометрической обработки (точности высотной составляющей ЦМР и абсолютных фаз, сравнения способов оценивания когерентности интерферометрических пар, оценивания эффективности подавления фазового шума), основанных на преобразовании значений эталонных высот в значения эталонных абсолютных фаз, которые, в отличие от существующих, не требуют завершения всех этапов интерферометрической обработки;

- модификация технологии интерферометрической обработки за счет параллелизации развёртывания фазы и фильтрации фазового шума, а затем, дополнительной фильтрации остаточной интерферограммы.

Все перечисленные результаты соотносятся с положениями, выносимыми на защиту.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в развитии научного аппарата космической радиолокационной интерферометрии предложенной моделью интерферометрической фазы и её разрывов. В работе также получены аналитические выражения для преобразования значений эталонных высот в значения эталонных абсолютных фаз для получения оценок точности результатов на основных этапах интерферометрической обработки. Практическая значимость исследования заключается в создании комплекса программ, реализующих предложенные автором алгоритм развёртывания фазы и методики экспериментального оценивания точности ЦМР или абсолютных фаз на основных этапах интерферометрической обработки.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы

Достоверность полученных результатов обеспечены корректным использованием математического аппарата, обоснованностью допущений и ограничений, согласованностью с известными экспериментальными результатами.

Результаты диссертационной работы достаточно полно отражены в работах, опубликованных соискателем, в том числе в двух статьях в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России, и 15 работах, опубликованных в изданиях, индексируемых наукометрическими системами Scopus и/или Web of Science.

Содержание автореферата в полном объеме отражает основное содержание диссертации.

Полученные в диссертации результаты соответствует следующим направлениям исследований по паспорту научной специальности 2.2.16. Радиолокация и радионавигация:

- 5 – Синтез и анализ алгоритмов обработки сигналов и информации в радиолокационных и радионавигационных системах и устройствах;

- 13 – Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов и извлечения из них информации при воздействии помех;

- 20 – Разработка и исследование физических, математических и гибридных имитационных моделей радиолокационных и радионавигационных систем и устройств.

Замечания по диссертационной работе

1. Недостаточно обосновано использование гауссовой фильтрации низкочастотной составляющей встречного вихревого поля.

2. Не определены границы реализуемости алгоритма развертывания фазы, использующего встречное вихревое поле или, другими словами, не оценена «способность» встречного вихревого поля огибать разрывы сложной формы.

Отмеченные недостатки не снижают общую положительную оценку работы.

Заключение

В целом диссертация А.В.Сосновского «Повышение эффективности этапов интерферометрической обработки радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли из космоса», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые научные и практические результаты в области обработки сигналов космических радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны. Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата технических наук, а её автор Сосновский Андрей Васильевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.16. Радиолокация и радионавигация.

Автор отзыва даёт согласие на обработку персональных данных.

Официальный оппонент – научный работник ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина» (г. Воронеж), кандидат технических наук (6.2.11. Военная электроника, аппаратура комплексов военного назначения) *ln* *o*

 Ницак Дмитрий Анатольевич

«11» сентября 2023 г.

394064, Россия, Воронежская обл., г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А.

Подпись  Дмитрия Анатольевича заверяю:

Врид  ов ВУНЦ ВВС «ВВА»

 Тарлыков Роман Николаевич