

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ
Б.Н. ЕЛЬЦИНА»



На правах рукописи

СОСНОВСКИЙ Андрей Васильевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭТАПОВ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

Научная специальность: 2.2.16 — Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Екатеринбург
2023

Работа выполнена на кафедре радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий — РтФ ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: **Коберниченко Виктор Григорьевич**,
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
профессор департамента радиоэлектроники и связи

Официальные оппоненты: **Костров Виктор Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
Муромский институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых»,
профессор кафедры «Радиотехника»
Киселев Алексей Васильевич,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный технический
университет», профессор кафедры радиоприемных
и радиопередающих устройств
Ницак Дмитрий Анатольевич,
кандидат технических наук, ФГКВБОУ ВО
«Военный учебно-научный центр
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная
академия имени профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, научный работник

Защита состоится 28 сентября 2023 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 2.2.04.12 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Учёного совета)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=5012>

Автореферат разослан « » _____ 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Игнатков Кирилл Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из основных тенденций в построении современных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) стала реализация интерферометрической обработки сигналов (РСА-интерферометрии) для получения цифровых моделей рельефа (ЦМР) земной поверхности и карт смещений рельефа, в том числе за счёт создания орбитальных группировок радиолокационных спутников (TerraSAR-X/TanDEM-X, Cosmo-SkyMed, SARlupe, Sentinel-1A/B, «Кондор-Э», «Кондор-ФКА», YaoGan, ICEYE, Capella Space). С появлением специализированных программных комплексов обработки радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли (SARSCAPE, PHOTOMOD RADAR, Imagine IFSAR DEM, SNAP), открытием доступа к глобальным ЦМР SRTM и WorldDem стало возможным говорить о появлении информационной технологии космической радиолокационной интерферометрии. Результаты интерферометрической обработки применяются в задачах создания и обновления высотной основы топографических карт различных масштабов, экологического мониторинга зон проведения работ по добыче полезных ископаемых, геологических, гидрологических и гляциологических исследованиях, а также для контроля состояния транспортных коммуникаций. Развитие перспективных многоспутниковых систем для интерферометрической съёмки включено в подпрограмму «Приоритетные инновационные проекты ракетно-космической промышленности» государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России» на 2021–2030 гг. и предусматривает создание принципиально новых технологий тематической обработки данных от высокоинформативных космических радиолокационных комплексов. Актуальность данной тематики подтверждается ежегодным появлением в индексируемых изданиях нескольких десятков публикации, посвящённых различным аспектам интерферометрической обработки и оценке качества получаемых результатов, проведением научно-исследовательских работ в данной области ведущими научно-исследовательскими организациями России (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, АО «Концерн радиостроения «Вега», АО «НИИ ТП» и др.).

Суть метода космической радиолокационной интерферометрии заключается в совместной обработке фазовых полей, полученных съёмкой одного и того же участка местности одновременно двумя антенными системами либо одной антенной на двух витках орбиты. Интерферометрическая обработка включает несколько этапов преобразования радиолокационной информации, основными из которых являются формирование интерферограммы, подавление фазового шума и устранение неоднозначности фазовых измерений — развёртывание фазы. К числу основных проблем, которые приходится преодолевать при построении ЦМР по данным интерферометрической съёмки, в первую очередь, относятся декорреляция отраженных сигналов и сложность развёртывания фазы, особенно при обработке радиолокационных данных высокого разрешения, содержащих большое количество областей разрыва фазы (в первую очередь при съёмке городской территории — зданий и сооружений). Открытыми остаются также вопросы получения экспериментальных оценок точности формируемых ЦМР. Поэтому являются актуальными научные задачи разработки и модификации алгоритмов интерферометрической обработки и создания методик экспериментальной оценки эффективности как всей технологической цепочки, так и основных ее этапов, что обуславливает актуальность темы диссертационного исследования.

Степень разработанности темы. Становление и развитие технологии интерферометрической обработки радиолокационных данных, сначала для измерения характеристик рельефа ближайших тел Солнечной системы, а затем и при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) из космоса связано с работами В.А. Котельникова, Е.А. Ксенофонтова, А.И. Захарова,

А.И. Баскакова, В.О. Михайлова, М.И. Бабокина, Л.Б. Неронского, Е.Ф. Толстова, Б.Г. Кутузы, О.В. Горячкина, И.В. Елизаветина, И.Ф. Купряшкина, А.А. Феоктистова, А.В. Ксендзука, В.В. Кострова, Э. Родригеза (США), Р. Бамлера (ФРГ), Р.Ф. Ханссена (Нидерланды), Ф. Рокка (Италия), П. Розена (США), С. Мэдсена (Дания) и др. В области развития методов интерферометрической обработки, в первую очередь — методов развёртывания фазы, основные результаты получены в работах Р.И. Шувалова, М.А. Егошкина, А.В. Филатова, Р. Голдштейна (США), Г. Цебкера (США), М. Константины (Италия), Дж. Форнаро (Италия), К. Чена (США), С. Томиоки (Япония) и др.

Однако ряд аспектов интерферометрической обработки космических радиолокационных данных ДЗЗ проработан недостаточно. В частности, не разработаны метод и алгоритм развёртывания фазы, обеспечивающие достаточную точность в условиях наличия большого количества разрывов фазы и имеющие при этом линейную (относительно количества элементов интерферограммы и количества точек разрыва фазы на ней) или близкую к ней вычислительную сложность для обработки интерферограмм больших размеров. Существующие методики экспериментальной оценки точности получаемых цифровых моделей рельефа неудобны для использования при разработке новых и модификации существующих алгоритмов из-за того, что количественный результат можно получить только по завершении всей процедуры обработки. Оценки точности, полученные таким способом, не позволяют определить источники ошибок, оценить эффективность отдельных этапов интерферометрической обработки и сформировать рекомендации по выбору алгоритмов обработки и/или их параметров.

Объектом исследования в диссертации являются радиолокационные системы космического наблюдения с синтезированной апертурой антенны.

Предмет исследований — методы и алгоритмы интерферометрической обработки космических радиолокационных данных ДЗЗ, методики анализа эффективности основных этапов интерферометрической обработки.

Цель исследования — повышение точности построения цифровых моделей рельефа земной поверхности методом космической радиолокационной интерферометрии.

Для достижения цели в работе были сформулированы и решены следующие **основные задачи**:

1. Проведение аналитического обзора алгоритмов интерферометрической обработки, методов оценивания точности восстановления абсолютной фазы, получаемой при интерферометрической обработке, и уточнение формулировок задач диссертационного исследования — *решается в главе 1*;

2. Создание дискретной математической модели интерферограмм с разрывами фазы и разработка с её использованием метода развёртывания фазы для интерферограмм больших размеров и с большим количеством разрывов фазы — *решается в главе 2*;

3. Разработка методик экспериментальной оценки точности результатов основных этапов интерферометрической обработки (развёртывания фазы, фильтрации фазового шума, накопления, оценивания когерентности) — *решается в главе 3*;

4. Проведение экспериментальной оценки и сравнения эффективности алгоритмов, применяемых на различных этапах интерферометрической обработки радиолокационных данных ДЗЗ из космоса, определение оптимальных параметров алгоритмов и разработка предложений по модификации последовательности интерферометрической обработки — *решается в главе 4*.

Методология и методы исследования. Для решения перечисленных задач были использованы методы цифровой обработки сигналов, математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, теории алгоритмов.

Информационную базу исследования составили научные труды ведущих отечественных и зарубежных учёных в области радиолокационного зондирования земной поверхности и интерферометрической обработки радиолокационных данных ДЗЗ, опубликованные в монографиях, ведущих научных журналах, материалах российских и международных научных конференций.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем:

1. Впервые предложена **математическая модель** интерферометрической фазы и её разрывов, **основанная на** комплекснозначном дискретном представлении интерферограммы, **в которой, в отличие от** общепринятой, интерферометрическая фаза является аргументом функции комплексной переменной с единичной амплитудой, а разрывы фазы представляются в виде нулей и полюсов функции комплексной переменной полиномиального вида, заданной на комплексной плоскости из координат элементов интерферограммы.

2. Разработаны новый **метод** развёртывания фазы и реализующий его алгоритм, **основанные на** прямом устранении разрывов фазы с помощью встречного вихревого поля фазы и рекурсивном выравнивании этого поля, **в отличие от существующих**, имеющих почти линейную вычислительную сложность и допускающий выполнение на параллельных вычислительных устройствах.

3. Созданы **методики** 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), **основанные на** преобразовании значений эталонных высот в значения эталонных абсолютных фаз, **которые, в отличие от существующих**, не требуют завершения всей последовательности интерферометрической обработки для получения оценок точности.

4. Предложена **модификация** технологии интерферометрической обработки, **в которой, в отличие от существующей**, развёртывание фазы и фильтрация фазового шума осуществляются параллельно, а затем дополнительной фильтрации (пост-фильтрации) подвергается остаточная интерферограмма.

Теоретическая значимость исследования 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. Созданный алгоритм развёртывания фазы может быть реализован на параллельных вычислительных системах для получения высокодетальных ЦМР больших размеров.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Модель интерферометрической фазы в виде комплексной интерферограммы **позволяет** без потери точности сократить объём используемых данных на основных этапах интерферометрической обработки за счёт отказа от использования амплитудной информации комплексных радиолокационных изображений, а также **позволяет** компактным образом формулировать описания разрывов фазы интерферограммы.

2. Метод развёртывания фазы, основанный на выравнивании встречного вихревого поля фазы, **позволяет** эффективно устранять разрывы фазы, восстанавливает с высокой точностью абсолютную фазу, конгруэнтную исходной интерферометрической фазе, и при этом

имеет почти линейную вычислительную сложность.

3. Методики экспериментального оценивания эффективности этапов интерферометрической обработки, основанные на преобразовании значений эталонных высот в значения эталонных абсолютных фаз, **обеспечивают** возможность экспериментального определения эффективности различных алгоритмов для основных этапов интерферометрической обработки.

4. Предложенная модификация технологии интерферометрической обработки **позволяет** повысить точность восстановления абсолютной фазы на 5–10% и поддерживать её почти постоянной при изменении параметра частоты среза амплитудно-частотной характеристики фильтра фазового шума, что снижает требования к выбору его оптимальных параметров.

5. Результаты экспериментальной оценки эффективности развёртывания фазы **показывают**, что точность определения высот ЦМР, полученных предложенным методом развёртывания фазы и с использованием предложенной модификации технологии интерферометрической обработки, на 20–25% выше для интерферограмм большого размера, чем у других известных алгоритмов.

Научное положение 1 соответствует направлению 20, положение 2 — направлению 5, положения 3–5 — направлению 13 паспорта научной специальности 2.2.16 «Радиолокация и радионавигация».

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

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на IX и X международных научно-технических конференциях «Физика и технические приложения волновых процессов» (г. Самара, 2008, г. Челябинск, 2010); IX, X, XIV, XV Всероссийских открытых конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2011, 2012, 2016, 2017); 24-й и 29-й Международных конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии – КРЫМИКО» (Севастополь, 2014, 2019); 4th International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts «AIST’2015» (г. Екатеринбург); XVII и XXII международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь» — RLNC’2011 и RLNC*2016 (г. Воронеж); 16–17 международных конференциях по численному анализу и прикладной математике «ICNAAM» (г. Родос, Греция, 2018–2020 гг.); XIV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения – АПЭП-2018» (г. Новосибирск); 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology «USBREIT» (г. Екатеринбург); V–VII Международных конференциях «Информационные технологии и нанотехнологии» (г. Самара, 2019–2021); Всероссийских открытых Армандовских чтениях «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (г. Муром, 2022); XV Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» (г. Москва, 2022).

Внедрение результатов исследования. Результаты диссертационной работы используются в АО «Урало-Сибирская геодезическая компания», ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в производственном процессе и при проведении НИОКР. Материалы диссертационной работы использованы в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина при выполнении НИР № 5.1.1.140.с2.з1-16/2 «Разработка методов интерферометрической обработки радиолокационных изображений космических систем дистанционного зондирования Земли» (2016), при выполнении работ по гранту РФФИ № 19-29-09022, проекта № 0836-2020-0020

Минобрнауки России, а также в учебном процессе в департаменте радиоэлектроники и связи и на кафедре радиоэлектроники и телекоммуникаций, что подтверждают приложенные акты об использовании научных результатов в практической деятельности.

Публикации. По теме диссертации опубликована 31 работа, в том числе 17 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России, из них 15 статей в изданиях, индексируемых международными цитатно-аналитическими базами данных Scopus и/или Web of Science.

Личный вклад автора. Результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Все методы, модели, методики и алгоритмы, приведенные в работе, были разработаны и экспериментально исследованы автором самостоятельно. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включена только та их часть, которая выполнена лично автором. Научный руководитель принимал участие в постановке целей и задач исследования, их предварительном анализе, планировании экспериментов, а также в обсуждении полученных результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Работа изложена на 143 страницах машинописного текста, включая 54 рисунка и 5 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 153 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, определены объект и предмет исследований.

В **первой главе** приведён аналитический обзор принципов, этапов и проблем, связанных с реализацией и применением интерферометрической обработки данных космических РСА высокого пространственного разрешения при построении и оценке точности ЦМР земной поверхности. Рассмотрены методы и алгоритмы, используемые на основных этапах интерферометрической обработки (рис. 1): совмещение (взаимопривязка) двух радиолокационных изображений (РЛИ) $Z_{1,m,n}$ и $Z_{2,m,n}$ и формирование интерферограммы $\Delta\varphi_{m,n}$ путём поэлементного перемножения двух комплексных РЛИ; компенсация фазового набега (выравнивание фазы); межэлементное некогерентное накопление; подавление (фильтрация) фазового шума; устранение фазовой неоднозначности — развёртывание фазы; пересчёт абсолютных (развёрнутых) фаз в высоты рельефа и геопривязка (переход от полётной системы координат к географической).

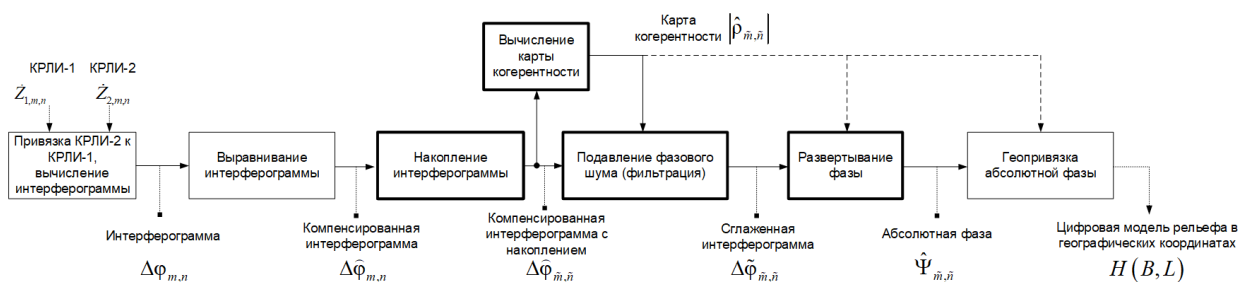


Рис. 1: Этапы интерферометрической обработки радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности

Математическое описание исходной интерферометрической фазы (интерферограммы) в дискретных координатах («Путевая дальность — Наклонная дальность») включает составляющие фазы, связанные с рельефом местности (топографическая фаза — $\Psi_{m,n}$), его изменениями за время между радиолокационными съёмками (дифференциальная топографическая

фаза — $\Delta\varphi_{D,m,n}$), изменением условий распространения радиоволн в атмосфере — $\Delta\varphi_{atm,m,n}$ и фазовый шум $\Delta\varphi_{noise,m,n}$.

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_{m,n} &= \arg \left\{ \dot{Z}_{1,m,n} \cdot \dot{Z}_{2,m,n}^* \right\} \approx W \left\{ -\Psi_{m,n} - \Delta\varphi_{D,m,n} + \Delta\varphi_{atm,m,n} + \Delta\varphi_{noise,m,n} \right\} \\ \Psi_{m,n} &= \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{m,n},\end{aligned}\quad (1)$$

где m, n — координаты элементов (пикселей) интерферограммы, $\Delta R_{m,n}$ — разность минимальных (на траверзе) наклонных дальностей от РСА до элемента поверхности при первой и второй съёмках, $W\{\cdot\}$ — оператор свёртывания фазы в интервал однозначности $[-\pi.. \pi]$.

Основными задачами интерферометрической обработки являются подавление фазового шума и развёртывание фазы. Последнее представляет собой процесс преобразования картины двумерной относительной фазы, принимающей значения только в интервале $[-\pi.. \pi]$, в картину абсолютной фазы, диапазон принимаемых значений для которой не ограничен. Этот этап до сих пор остаётся самым проблемным этапом интерферометрической обработки, т.к. подобная задача в принципе не имеет однозначного решения. Для развёртывания фазы разработано несколько десятков алгоритмов, основанных на аппарате из различных областей современной математики: теории векторных полей (метод вставки ветвей отсечения, метод функций Грина), теории оптимизации (метод целочисленной оптимизации, метод минимальной стоимости потока), теории фильтрации (метод фильтрации Калмана, метод нелинейной стохастической фильтрации и др.), решении больших систем уравнений (метод наименьших квадратов), генетических алгоритмов, нейронных сетей и т.п. Основной подход к решению этой задачи заключается в интегрировании фазового градиента вдоль какой-либо траектории, охватывающей все элементы интерферограммы. В дискретной постановке задачи такое развёртывание осуществляется путем вычисления разностей фаз соседних элементов $\delta\varphi_{m,n}$ со свёртыванием их в интервал однозначности и последующим суммированием полученных разностей:

$$\begin{aligned}\delta\varphi_{m,n} &= W \left\{ \Delta\varphi_{m,n} - \Delta\varphi_{m-m_i, n-n_j} \right\}, \\ \Psi_{m,n} &= \delta\varphi_{m,n} + \delta\varphi_{m-m_i, n-n_j}\end{aligned}\quad (2)$$

где $m_i = 1, n_j = 0$ при развёртывании интерферограммы по направлению вниз по вертикали (по столбцам), либо $m_i = 0, n_j = 1$ при развёртывании вправо по горизонтали (по строкам). Решение задачи осложняется наличием на интерферограмме разрывов фазы — нарушений непрерывности интерферограммы, при которых возникает зависимость результата развёртывания от направления суммирования разностей (2). В точках разрыва фазы нарушается условие равенства нулю суммы разностей фаз на элементарном замкнутом контуре:

$$\begin{aligned}Q_{m,n} &= W \left\{ \Delta\varphi_{m,n} - \Delta\varphi_{m-1,n} \right\} + W \left\{ \Delta\varphi_{m-1,n} - \Delta\varphi_{m-1,n-1} \right\} + \\ &+ W \left\{ \Delta\varphi_{m-1,n-1} - \Delta\varphi_{m,n-1} \right\} + W \left\{ \Delta\varphi_{m,n-1} - \Delta\varphi_{m,n} \right\}.\end{aligned}\quad (3)$$

Функция вычетов в точках разрыва равна $\pm 2\pi q$, где $q \in \mathbb{N}$ — порядок разрыва. Знак $Q_{m,n}$ (знак точки разрыва) определяет направление возрастания поля фазы при обходе разрыва по замкнутому контуру: «+» соответствует возрастанию поля против часовой стрелки, «-» — возрастанию при обходе по часовой стрелке. Точки разрыва встречаются на интерферограмме, как правило, парами с разными знаками и соединяются виртуальной линией (линией разрыва фазы), при пересечении которой в процессе развёртывания по правилу (2) возникает ошибка, заключающаяся в появлении или пропуске одной интерференционной полосы (рис. 2), и абсолютная фаза в такой ситуации в принципе не может быть восстановлена однозначно.

Большинство алгоритмов развёртывания фазы, в том числе и считающиеся наиболее эф-

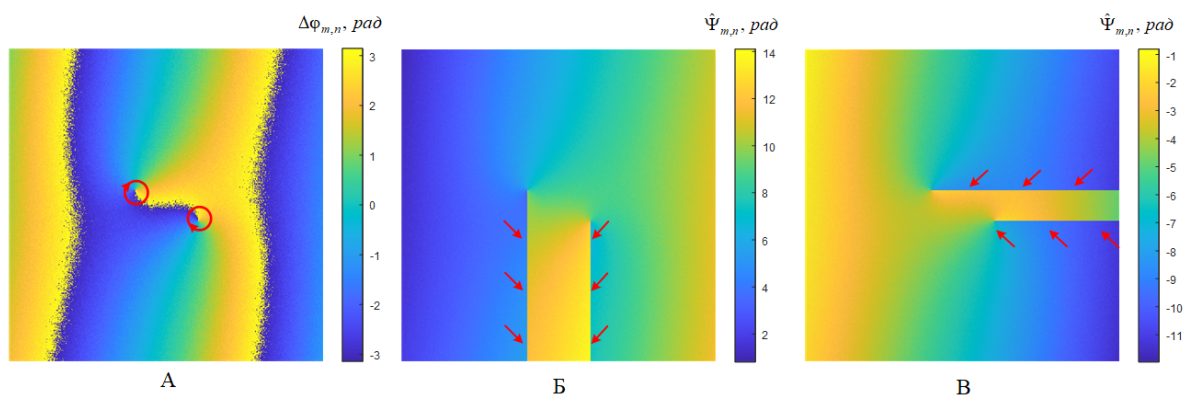


Рис. 2: Ошибка (артефакт) развёртывания фазы при прохождении линии разрыва: А) исходная интерферограмма; Б) развёртывание интерферограммы по правилу (2) в горизонтальном направлении; В) развёртывание интерферограммы по правилу (2) в вертикальном направлении (стрелками показаны границы артефакта — «лишней» интерференционной полосы)

фективными (в частности, алгоритм минимальной стоимости потока и его модификации), имеют высокую вычислительную сложность и требуют использования приближений и упрощений, приводящих к снижению точности. Возможность ускорения вычислений по алгоритму при обработке интерферограмм большого размера за счёт использования параллельных вычислений у большинства алгоритмов также ограничены, а используемое в таких случаях блочное разбиение интерферограмм также приводит к снижению точности результата.

Обзор методов экспериментального оценивания точности высот ЦМР, получаемых интерферометрическим методом, показывает, что существующие методики предполагают полное завершение интерферометрической обработки, получение цифровой модели рельефа и последующее её сравнение с эталоном — картографической ЦМР, данными глобальных радионавигационных систем, результатами лазерной съемки. Однако такой подход имеет высокую трудоемкость и не позволяет отделить ошибки развёртывания фазы от ошибок, возникающих на других этапах (подавлении фазового шума, некогерентного накопления, геопривязки). В заключительной части главы уточнены задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке метода развёртывания фазы для интерферограмм больших размеров и с большим количеством разрывов фазы.

Предложена классификация разрывов интерферометрической фазы по уровню сложности развёртывания на 3 типа: 1) элементарные (шумовые) разрывы (рис. 3-А), охватывающие 2 соседних элемента интерферограммы (устраняются заменой значения фазы в точке разрыва на ноль); 2) протяжённые разрывы (рис. 3-Б), вызываемые наложением радиолокационных эхо-сигналов и образующие линию разрыва фазы; 3) кольцевые разрывы (рис. 3-В), которые появляются из-за дискретного характера интерферограммы и не могут быть разрешены без использования априорной информации о рельефе поверхности.

Для математического описания интерферометрической фазы предложена модель в виде комплексной интерферограммы — функции комплексной переменной $\dot{I}(z)$, составленной следующим образом:

$$\dot{I}(z) = e^{j\Delta\varphi_{m,n}} \Big|_{z=m+j \cdot n}, \quad (4)$$

где $z = m + j \cdot n$ — дискретный аргумент комплексной интерферограммы. Данная модель не использует амплитудную информацию комплексных РЛИ (КРЛИ), что позволяет сократить объём используемых данных на последующих этапах интерферометрической обработки (некогерентном накоплении, оценивании когерентности, фильтрации фазового шума). В

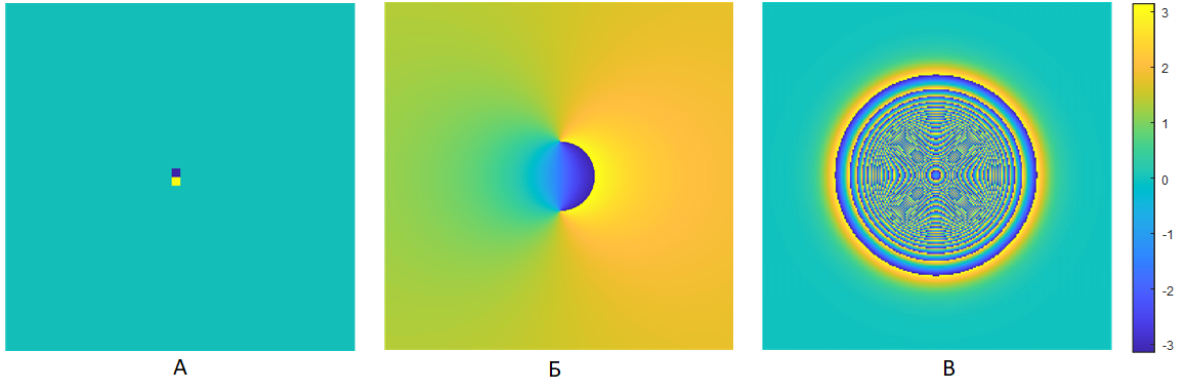


Рис. 3: Разрывы интерферометрической фазы: А) элементарный разрыв; Б) протяжённый разрыв; В) кольцевой разрыв

главе 4 работы показано, что отказ от использования амплитудной информации КРЛИ не приводит к снижению точности результатов интерферометрической обработки.

Модель позволяет компактным образом описывать разрывы фазы интерферограммы. Наиболее часто встречающиеся разрывы 2-го типа при использовании предложенной модели описываются в виде функции комплексной переменной $J(z)$ (элементарным вихрем):

$$J^{\pm}(z) = \exp(\pm j \cdot q \cdot \arg\{z - z_{(0/p)}\}), \quad (5)$$

где $z_{(0/p)} = m_{(0/p)} + j \cdot n_{(0/p)}$ — координаты точки разрыва с положительным и отрицательным знаком.

В основе предложенного метода развёртывания фазы лежит непосредственное устранение разрывов фазы 2-го типа искусственными разрывами противоположного знака, формирующими встречное вихревое поле фазы, и рекурсивном выравнивании встречного вихревого поля. Непрерывность фазы может быть восстановлена, если в каждую точку разрыва интерферограммы q -го порядка и положительного знака искусственно поместить нуль q -го порядка, а в точку разрыва с отрицательным знаком — полюс q -го порядка. Совокупность элементарных вихрей (5) образует встречное вихревое поле фазы интерферограммы $\dot{C}_*(z)$:

$$\dot{C}_*(z) = \exp\left(j \cdot \arg\left\{\frac{(z - z_{p1})^{q_{p1}}(z - z_{p2})^{q_{p2}} \dots (z - z_{p\mu})^{q_{p\mu}}}{(z - z_{01})^{q_{01}}(z - z_{02})^{q_{02}} \dots (z - z_{0\nu})^{q_{0\nu}}}\right\}\right), \quad (6)$$

где μ, ν — количество точек разрыва интерферограммы положительного и отрицательного знака, соответственно. Умножение комплексной интерферограммы $\dot{I}(z)$ на встречное вихревое поле $\dot{C}_*(z)$ должно приводить к исчезновению точек разрыва фазы и формированию безразрывной относительной фазы, после чего окончательное развёртывание можно было бы произвести путём суммирования разностей (свёрнутых в интервал однозначности) вдоль любой траектории на интерферограмме, получив, таким образом, безразрывную абсолютную фазу $\tilde{\Psi}_{m,n}$ (рис. 4):

$$\tilde{\Psi}_{m,n} = \Upsilon_r \left\{ \arg\{\dot{I}(z) \cdot \dot{C}_*(z)\}_{z=m+jn} \right\}, \quad (7)$$

где $\Upsilon_r\{\}$ — символическое обозначение развёртывания по правилу (2) суммирования разностей соседних элементов интерферограммы.

Однако в силу дискретного характера интерферограммы и квантования значений фазы после такого умножения возможно появление новых точек разрыва или их перемещение на

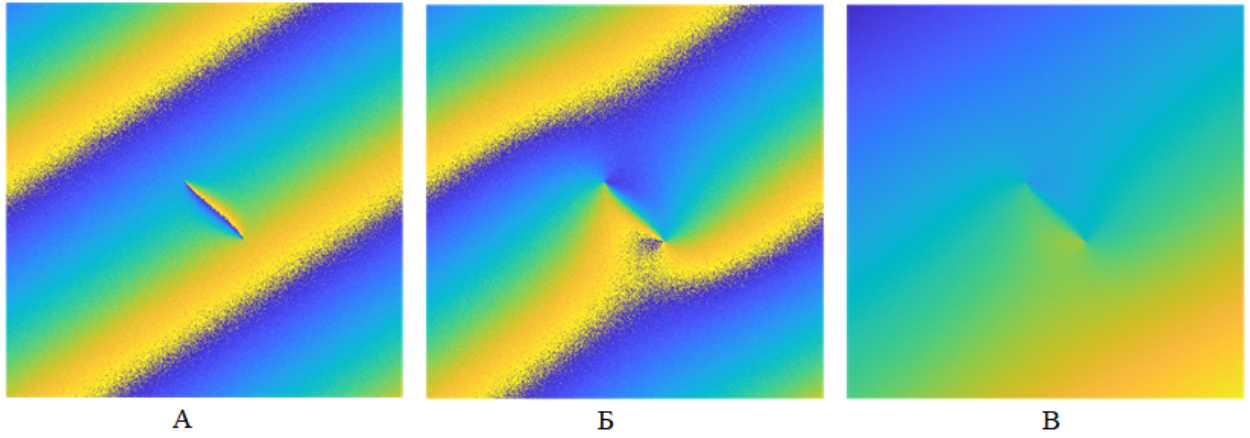


Рис. 4: Развёртывание интерферограммы с помощью встречного вихревого поля фазы: а) исходная интерферограмма; б) фаза произведения исходной интерферограммы и встречного вихревого поля; в) развернутая интерферограмма

новые позиции. Для их компенсации предлагается вновь производить расчёт функции вычетов $Q_{m,n}^{\text{II}}$, формировать новое встречное вихревое поле $\dot{C}_{\text{II}}(z)$ и вновь применять умножение на новое вихревое поле. Процедура такого формирования встречного вихревого поля фазы осуществляется итеративно и повторяется до тех пор, пока все разрывы фазы не будут полностью устранены. Итоговое встречное вихревое поле фазы $C_{**}(z)$ будет представлять собой произведение встречных вихревых полей, полученных на отдельных итерациях алгоритма:

$$\dot{C}_{**}(z) = \dot{C}_I(z) \cdot \dot{C}_{\text{II}}(z) \cdot \dot{C}_{\text{III}}(z) \cdot \dots \cdot \dot{C}_{K_{\text{Itr}}}(z), \quad (8)$$

где $\dot{C}_I(z), \dot{C}_{\text{II}}(z), \dots$ — встречные вихревые поля, полученные первой, второй и последующих итерациях алгоритма, K_{Itr} — число итераций. Далее абсолютная фаза формируется по правилу (7).

Для повышения точности абсолютной фазы и восстановления мелких деталей рельефа предложено восстанавливать конгруэнтность абсолютной фазы путём добавления остаточной интерферограммы (остаточной фазы):

$$\dot{I}_{\delta}(z) = \dot{I}(z) / e^{j\tilde{\Psi}_{m,n}} \Big|_{z=m+jn} = -\arg \dot{C}_{**}(z) \quad (9)$$

к безразрывной абсолютной фазе $\tilde{\Psi}_{m,n}$:

$$\hat{\Psi}_{m,n} = \tilde{\Psi}_{m,n} + \arg \left\{ \dot{I}_{\delta}(z) \Big|_{z=m+jn} \right\}. \quad (10)$$

Однако, для интерферограмм местностей с пересечённым рельефом возникает большое количество протяжённых разрывов фазы, линии которых на остаточной интерферограмме $\arg \{ \dot{I}_{\delta}(z) \}$ будут располагаться хаотично, что приводит к ряду проблем, снижающих точность получаемого результата:

- в областях концентрации большого количества точек разрыва или в случаях, когда парные точки разрыва отстоят далеко друг от друга, на интерферограмме остаточной фазы будут возникать низкочастотные флуктуации встречного вихревого поля фазы. Размах флуктуаций зачастую превышает интервал однозначности фазы, и это приводит к появлению лишних интерференционных полос на остаточной интерферограмме (рис. 5-А);

- траектории линий разрыва зачастую имеют рваный характер («эффект бахромы», рис.

5-Б);

– даже для близко расположенных пар точек разрыва могут образовываться закругления интерференционных полос, не обусловленные формой рельефа местности («эффект лунок», рис. 5-В);

– непарные точки разрыва, располагающиеся на краях интерферограммы порождают дополнительные интерференционные полосы на краях и в углах интерферограммы (рис. 5-Г).

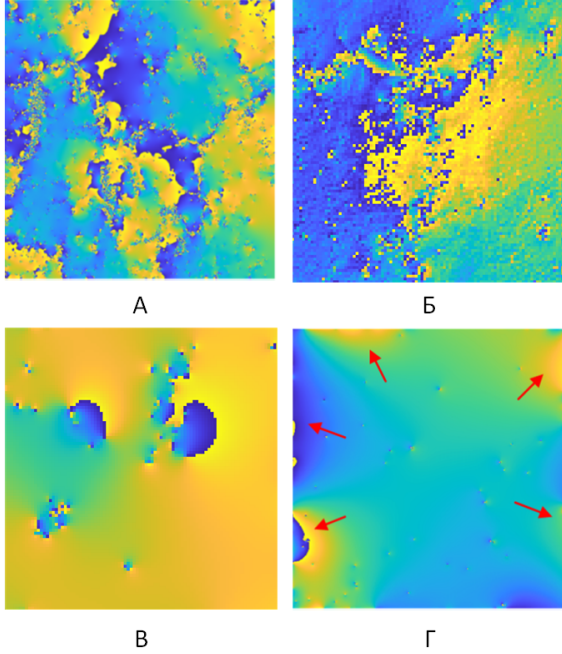


Рис. 5: Эффекты поведения фазы встречного вихревого поля: А) лишние интерференционные полосы и низкочастотные флуктуации, Б) «бахрома», В) «лунки», Г) краевые эффекты

ферограмма:

$$\begin{aligned}
 \dot{C}_{Ir.1}(z) &= \Upsilon_v\{\dot{I}(z)\} \\
 \dot{E}_{Ir.1}(z) &= \Omega_{\gamma_1}\{C_{Ir.1}(z)\} \\
 \dot{C}_{Ir.2}(z) &= \Upsilon_v\{\dot{E}_{Ir.1}(z)\} \\
 \dot{E}_{Ir.2}(z) &= \Omega_{\gamma_2}\{C_{Ir.2}(z)\} \\
 &\dots \\
 \dot{E}_{Ir.K_{I-Rc}}(z) &= \Omega_{\gamma_{K_{I-Rc}}}\{C_{Ir.K_{I-Rc}-1}(z)\},
 \end{aligned} \tag{11}$$

где $\Upsilon_v\{\cdot\}$ — символическое обозначение построения встречного вихревого поля по правилу (7), $\Omega_{\gamma_i}\{\cdot\}$ — символическое обозначение низкочастотной гауссовой фильтрации с частотой среза АЧХ фильтра F_i , $\dot{C}_{Ir.i}(z)$ — встречные вихревые поля после i -х шагов рекурсии, $\dot{C}_{Ir.1}(z) = \dot{C}(z)$, $\dot{E}_{Ir.1}(z)$ — низкочастотные составляющие встречных вихревых полей, K_{I-Rc} — глубина рекурсивного спуска на I итерации. Из этих вихревых полей формируется встречное вихревое поле первой итерации алгоритма $\dot{C}_{I-Rc}(z)$:

$$\dot{C}_{I-Rc}(z) = \frac{C_{Ir.1}(z)}{\dot{E}_{Ir.1}(z)} \cdot \frac{C_{Ir.2}(z)}{\dot{E}_{Ir.2}(z)} \cdot \dots \cdot \frac{1}{\dot{E}_{Ir.K_{I-Rc}}(z)}. \tag{12}$$

Аналогичным образом происходит построение встречного вихревого поля на следующих итерациях алгоритма, абсолютная фаза рассчитывается по правилу (10), где вместо $\dot{C}_{**}(z)$ при расчёте остаточной интерферограммы используется произведение встречных вихревых

полей на всех рекурсивных переходах $\dot{C}(z)$:

$$\dot{C}(z) = \dot{C}_{I-Rc}(z)\dot{C}_{II-Rc}(z)\dots\dot{C}_{N-Rc}(z) \quad (13)$$

Получаемое в результате применения рекурсивной обработки встречное вихревое поле имеет заметно меньший уровень низкочастотных флуктуаций, чем при прямой обработке по правилам (6)-(7) (рис. 6-А,Б), что приводит к существенному снижению ошибок развёртывания фазы.

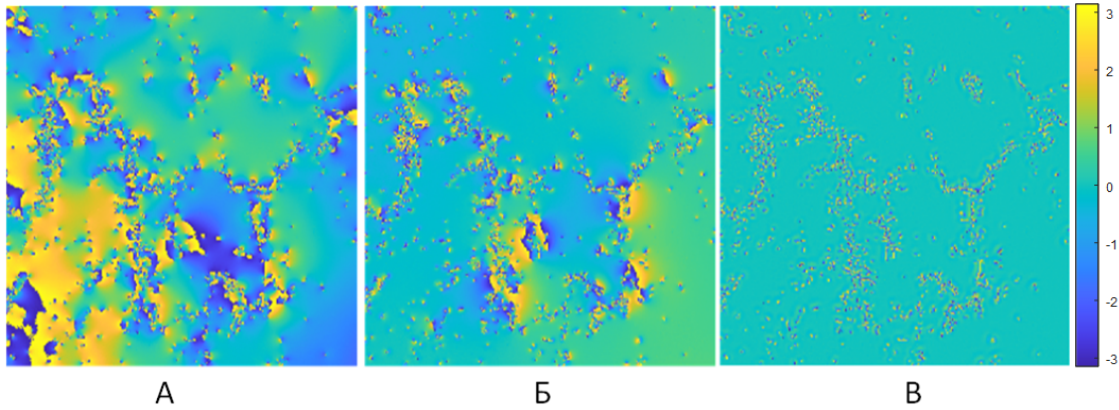


Рис. 6: Встречное вихревое поле интерферограммы ALOS PALSAR: А) с выравниванием с помощью двух проходов по правилам (6)-(7); Б) с рекурсивным выравниванием; В) с рекурсивным выравниванием и фильтрацией с адаптивно подбираемой частотой среза АЧХ фильтра

Для дополнительного подавления эффектов «бахромь» и «лунок» на остаточной интерферограмме $\dot{I}_\delta(z)$ предложено дополнительно использовать её пост-фильтрацию с выделением из неё безразрывной низкочастотной фазовой составляющей с максимально возможной верхней граничной частотой спектра, для чего предложено использовать фильтр нижних частот с адаптивно подстраиваемой частотой среза АЧХ. Подстройка частоты осуществляется так, чтобы найти максимальную частоту, при которой функция вычетов сглаженной этим фильтром остаточной интерферограммы $\dot{I}_\delta(z)$ остаётся всюду равной нулю. Результат применения алгоритма развёртывания фазы с рекурсивным выравниванием и пост-фильтрацией представлен на рисунке 6-В. Из него видно, что после нескольких циклов фильтрации интерференционные полосы спрямляются и укорачиваются, а остаточная фаза становится почти всюду равной нулю.

Предложенный метод развёртывания фазы на основе выравнивания встречного вихревого поля фазы (метод ВВПФ) реализован в виде совокупности алгоритмов, реализующих следующие процедуры:

0) инициализация входных данных и параметров: интерферограмма $\dot{I}(z)$, частота среза АЧХ фильтра F_S ;

1) обнаружение точек разрыва (расчёт функции вычетов интерферограммы $Q_{m,n}$) и подсчёт их количества $\mu + \nu$; если $\mu + \nu = 0$, то переход к п. 6;

2) вычисление встречного вихревого поля $\dot{C}(z)$ по формуле (6);

3) фильтрация поля $\dot{C}(z)$ и получение сглаженного встречного вихревого поля $\dot{E}(z)$ по формуле (11);

4) вычисление количества точек разрыва сглаженного встречного вихревого поля $\mu_E + \nu_E$; если $\mu_E + \nu_E = 0$, то принять встречное вихревое поле $\dot{C}(z)$ равным сглаженному $\dot{E}(z)$, иначе возврат к шагу 0 с входными аргументами $F_S/4, \dot{I}(z) \leftarrow \dot{I}(z)\dot{C}(z)/\dot{E}(z)$;

5) вычисление безразрывной абсолютной фазы по формуле (7) и остаточной интерферограммы по формуле (9);

6) вычисление развёрнутой интерферограммы по формуле (10).

Предложен вариант, позволяющий реализовывать вычисление встречного вихревого поля (этап 2) на параллельных вычислительных системах.

Исследование точности восстановления абсолютной фазы предложенным методом ВВПФ и другими распространёнными методами (алгоритм «растущих регионов» — Region Growing, алгоритм минимальной стоимости потока — MCF) производилось на различных тестовых интерферограммах (модели «озеро» и «гауссов холм») с размером от 500×500 до 2500×2500 элементов. Исследование показало (таблица 1), что предложенный алгоритм развёртывания работает устойчиво и с точностью, сопоставимой с точностью алгоритма минимальной стоимости потока для интерферограмм небольших размеров (до 1000×1000 элементов), и лучшей точностью для интерферограмм большого размера (до 2500×2500 элементов и более).

Таблица 1: Ошибки абсолютной фазы σ_ψ для тестовых интерферограмм

Алгоритм	σ_ψ , рад			
	Модель 1 («озеро»)		Модель 2 («гауссов холм»)	
	500×500	1500×1500	500×500	2500×2500
Простое развёртывание (алгоритм по формуле (2))	2,5	4,3	17,2	16,3
Region Growing	2,1	4,1	15,7	11,3
MCF	0	2,7	0,55	6,51
ВВПФ	0	0	0,80	4,67

Вычислительная сложность предложенного алгоритма в рамках одной итерации имеет вид $O(M_I \times N_I \times (\mu + \nu))$, где M_I, N_I — размеры интерферограммы, $\mu + \nu$ — количество точек разрыва фазы на ней. Экспериментальная оценка быстродействия показала, что вычислительная сложность всего алгоритма (с учётом всех итераций и рекурсивных переходов) является почти линейной.

Третья глава посвящена разработке методик экспериментального оценивания эффективности алгоритмов, используемых на основных этапах интерферометрической обработки. Проанализированы проблемы интерпретации ЦМР, полученных методом космической радиолокационной интерферометрии, определены требования к тестовым участкам. Для экспериментальной оценки предложено использовать эталон в виде набора отметок высот топографических карт и наземные опорные точки (радиолокационные ориентиры) — элементы местности с известными координатами и хорошо распознаваемые на амплитудном радиолокационном изображении.

Методики основаны на предложенном методе преобразования эталонных высот, который включает в себя следующие этапы: преобразование системы координат эталонных отметок высот $\{B_i, L_i, H_{0i}\}$ в систему координат РЛИ «Путевая дальность — Наклонная дальность» $\{m_i, n_i\}$; вычисление параметров связи фаз и высот из наборов значений абсолютных фаз $\{\hat{\Psi}_i\}$, полученных при интерферометрической обработке, и значений соответствующих этим фазам эталонных геодезических высот $\{H_{0i}\}$; преобразование значений эталонных высот $\{H_{0i}\}$ в значения эталонных абсолютных фаз Ψ_{0i} (или значений абсолютных фаз $\{\hat{\Psi}_i\}$ в значения высот \hat{H}_i) с использованием рассчитанных параметров связи. Для преобразований

фаз и высот используются следующие выражения:

$$\Psi_{0i} = \hat{U}_H H_{0i} + \hat{U}_m \dot{m}_i + \hat{U}_{m2} \dot{m}_i^2 + \hat{U}_n \dot{n}_i + \hat{U}_{n2} \dot{n}_i^2 + \hat{U}_{mn} \dot{m}_i \cdot \dot{n}_i + \bar{\Psi}_0, \quad (14)$$

или

$$\hat{H}_i = \hat{V}_\Psi \Psi_i + \hat{V}_m \dot{m}_i + \hat{V}_{m2} \dot{m}_i^2 + \hat{V}_n \dot{n}_i + \hat{V}_{n2} \dot{n}_i^2 + \hat{V}_{mn} \dot{m}_i \cdot \dot{n}_i + \bar{H}, \quad (15)$$

где $\hat{U}_H, \hat{U}_m, \hat{U}_n$ — оценки коэффициентов (параметров связи) линейного преобразования эталонных высот в абсолютные фазы; $\hat{V}_\Psi, \hat{V}_m, \hat{V}_n$ — оценки коэффициентов (параметров связи) линейного преобразования абсолютных фазы в высоты цифровой модели рельефа, $\hat{U}_{m2}, \hat{U}_{n2}, \hat{U}_{mn}, \hat{V}_{m2}, \hat{V}_{n2}, \hat{V}_{mn}$ — оценки параметров связи II порядка, $\bar{\Psi}_0$ — оценка среднего значения эталонной фазы, \bar{H} — оценка среднего значения высоты цифровой модели рельефа. Выражение (14) позволяет оценивать точность восстановления абсолютных фаз (в радианах), выражение (15) — точность определения высот (в метрах). Экспериментальный расчет параметров связи \hat{U} и/или \hat{V} производится по набору эталонных высот (для коэффициентов \hat{V}):

$$\begin{pmatrix} \hat{V}_\Psi \\ \hat{V}_m \\ \hat{V}_n \\ \hat{V}_{m2} \\ \hat{V}_{n2} \\ \hat{V}_{mn} \\ \bar{H} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{01} & \dot{m}_1 & \dot{n}_1 & \dot{m}_1^2 & \dot{n}_1^2 & \dot{m}_1 \cdot \dot{n}_1 & 1 \\ \hat{\Psi}_{02} & \dot{m}_2 & \dot{n}_2 & \dot{m}_2^2 & \dot{n}_2^2 & \dot{m}_2 \cdot \dot{n}_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{\Psi}_{0N_{GCP}} & \dot{m}_{N_{GCP}} & \dot{n}_{N_{GCP}} & \dot{m}_{N_{GCP}}^2 & \dot{n}_{N_{GCP}}^2 & \dot{m}_{N_{GCP}} \cdot \dot{n}_{N_{GCP}} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} H_{01} \\ H_{02} \\ \dots \\ H_{0N_{GCP}} \end{pmatrix} \quad (16)$$

где N_{GCP} — количество эталонных высот. Расчёт коэффициентов \hat{U} производится аналогичным образом. Такой способ преобразования позволяет устранять систематическую ошибку восстановления абсолютной фазы аналогично тому, как это происходит при её геопривязке после интерферометрической обработки, и результаты дальнейшего оценивания будут адекватны тем, что получены при оценивании точности цифровой модели рельефа в географической системе координат с той лишь разницей, что в них не будет присутствовать составляющая ошибки, обусловленная геопривязкой абсолютной фазы. Метод позволяет производить оценку точности восстановления абсолютной фазы алгоритмами интерферометрической обработки на основных этапах интерферометрической обработки (межэлементном некогерентном накоплении, фильтрации фазового шума, развёртывании фазы) и в условиях неточности информации об орбитальном движении носителя РСА.

После подстановки рассчитанных оценок коэффициентов (16) в формулы (14), (15) и получения наборов измеренных высот и эталонных абсолютных фаз, реализуется вычисление следующих критериев точности восстановления абсолютной фазы: а) среднеквадратичное отклонение (с.к.о.) высот в бортовой системе координат σ_H , которое позволяет оценивать точность результата интерферометрической обработки в целом (за исключением геопривязки); б) с.к.о. абсолютной фазы σ_Ψ , которое позволяет охарактеризовать точность результатов различных алгоритмов обработки в совокупности и алгоритмов развёртывания фазы в частности; в) с.к.о. разностного фазового угла сглаженной и эталонной фаз $\sigma_{\delta\varphi}$ для оценивания качества подавления фазового шума, г) с.к.о. разностного фазового угла сглаженной и эталонной фаз при различных значениях коэффициента когерентности участков сцены для сравнения способов оценивания когерентности.

На основе предложенного метода преобразования высот была разработана методика оценивания точности восстановления абсолютной фазы и высот ЦМР и методика оценивания эффективности подавления фазового шума при различных наборах параметров алго-

ритмов обработки. При этом в вычислениях минимальным образом используются значения параметров движения носителя, известные, как правило, с большой погрешностью. Её результатом являются экспериментальные зависимости среднеквадратичного отклонения развёрнутой и эталонной абсолютных фаз $\sigma_{\Psi}(p_k)$ (характеристики точности восстановления абсолютной фазы), среднеквадратичного отклонения высот ЦМР от эталонных высот $\sigma_H(p_k)$ (характеристики точности определения высот ЦМР) и разностного фазового угла интерферометрической фазы $\sigma_{\Delta\varphi}(p_k)$ (характеристика точности относительной фазы) от параметра p_k исследуемого алгоритма фильтрации фазового шума или алгоритма развёртывания фазы (где k — номер значения варьируемого параметра). Методики позволяют оценивать эффективность алгоритмов развёртывания фазы и подавления фазового шума при различных их параметрах без завершения всей процедуры интерферометрической обработки.

В **четвёртой главе** с использованием предложенных выше методик экспериментально оценивается точность различных вариантов метода выравнивания встречного вихревого поля фазы и предложенной модификации последовательности интерферометрической обработки. Также рассмотрены вопросы эффективности применения различных способов подавления фазового шума и сравнения способов оценивания когерентности интерферометрических пар.

Для экспериментальной оценки использованы радиолокационные данные, полученные РСА PALSAR космического аппарата ALOS ($\lambda = 23,5$ см) и представлены пятью интерферометрическими парами КРЛИ трёх разных местностей (таблица 2). КРЛИ получены при горизонтальной поляризации излучённой волны и горизонтальной (HH) либо вертикальной (HV) поляризациях отражённой волны. Съёмки производились в летний сезон, временной интервал между съёмками во всех случаях — 46 дней. Коэффициенты накопления для интерферограмм по дальности (c_R) были подобраны так, чтобы размеры кадров интерферограммы по дальности составляли не менее половины от исходных для режима съёмки с двойной поляризацией (Fine Beam Dual — FBD), и не менее четверти от исходного — для режима съёмки с одиночной поляризацией (Fine Beam Single — FBS), а величина коэффициента накопления по путевой дальности подбиралась так, чтобы интервалы пространственной дискретизации по путевой и наклонной дальностям были приблизительно одинаковыми. Эталонные высотные отметки рельефа тестовых участков получены из цифровых топографических карт масштаба 1:100 000 (система координат СК-95). В качестве радиолокационных ориентиров использовались как отметки, полученные по результатам проведения плано-высотного обоснования местности с использованием геодезического GPS/GNSS-приёмника Leica AX 1202 GG с дифференциальной коррекцией координат, так и отметки высот цифровых топографических карт, расположенные на хорошо опознаваемых на амплитудном радиолокационном изображении элементах местности.

Для оценивания точности восстановления фазы различных вариантов выравнивания встречного вихревого поля в работе были построены характеристики точности для этих реализаций, рассчитанные по фрагментам различных интерферометрических пар ALOS PALSAR. Варьируемым параметром p_k выступала частота среза АЧХ фильтра фазового шума F_{Sk} .

Для оценки эффективности рекурсивной реализации алгоритма выравнивания встречного вихревого поля фазы построены характеристики точности определения высот ЦМР для следующих вариантов алгоритма: а) восстановление только безразрывной абсолютной фазы при одном проходе алгоритма без рекурсивного выравнивания; б) восстановление конгруэнтной абсолютной фазы по правилам (6)-(7) при одном проходе алгоритма без рекурсивного выравнивания; в) восстановление безразрывной и конгруэнтной абсолютных фаз после трёх проходов алгоритма по остаточной интерферограмме без рекурсивного выравнивания;

Таблица 2: Параметры исследуемых интерферометрических пар КРЛИ

№ интерферограммы	Режим съёмки	Пространственное разрешение: азимут \times накл. дальность)	H_a (средняя), м	Тип рельефа	С.к.о. значений эталонных высот (геодезических), м
1	FBD (HH)	15,0 \times 3,1	18	холмистый	14,5
2	FBD (HV)	15,0 \times 3,1	18	холмистый	14,5
3	FBS	7,5 \times 3,1	60	холмистый	19,3
4	FBS	7,5 \times 3,1	125	холмистый	14,5
5	FBS	7,5 \times 3,1	45	низкогорный	65,8

г) рекурсивное развёртывание (1 и 2 прохода). Получившиеся результаты позволяют сделать вывод, что рекурсивная реализация обеспечивает наилучшую точность восстановления фазы, которая оказывается выше, чем точность конгруэнтной абсолютной фазы после трёх проходов развёртывания, на величину от 13% до 22%. Результаты оценки для сцены № 3 представлены на рисунке 8-А.

Для повышения точности развёртывания фазы предложена модификация последовательности интерферометрической обработки (рис. 7), заключающаяся в развёртывании несглаженной интерферограммы и последующей фильтрации остаточной интерферограммы $\hat{I}_\delta(z)$, позволяющая уменьшать ошибки из-за избыточной фильтрации на этапах подавления фазового шума.

Поскольку при подавлении фазового шума будут, среди прочего, происходить как вымывание мелких деталей рельефа, так и «склеивание» близко расположенных интерференционных полос, то была предложена модификация последовательности обработки путём параллельного выполнения развёртывания фазы и фильтрации фазового шума (рис. 7), в которой подавление фазового шума производится по отношению к выровненной интерферограмме, одновременно для этой же интерферограммы производится развёртывание фазы, далее вычисляется остаточная интерферограмма, для которой производится пост-фильтрация, после чего безразрывная абсолютная фаза и выровненная остаточная интерферограмма суммируются. Из полученных характеристик точности высот (рис. 8-Б) при использовании предложенной модификации был сделан вывод, что при её использовании точность результата сохраняется или даже увеличивается, при этом диапазон значений частоты среза фильтра фазового шума F_{Sk} , при котором достигаются наилучшие точности, расширяется в область малых частот, что снижает требования к выбору этого параметра.

Сравнительное исследование точности развёртывания фазы предложенным алгоритмом и предложенной модификацией последовательности интерферометрической обработки в сравнении с другими алгоритмами (рис. 8-В,Г,Д) показало, что почти во всех сценах точность восстановления высот (от 4,1 м для сцен с холмистым рельефом до 12,0 м — для сцен с низкогорным рельефом) оказалась сопоставима с таковой для алгоритма минимальной стоимости

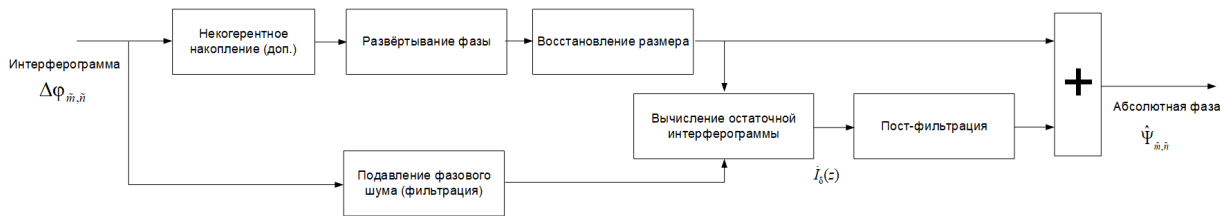


Рис. 7: Модификация последовательности интерферометрической обработки с развёртыванием фазы несглаженной интерферограммы

потока (MCF — SARscape), причём в некоторых сценах результаты полностью совпадали, что позволяет говорить о том, что полученные значение точности являются предельным для интерферометрического метода в рамках конкретной сцены, съёмочной аппаратуры и режима её работы. При этом точность других алгоритмов (алгоритма функций Грина, алгоритма наименьших квадратов — PHOTOMOD RADAR) оказалась ниже при любых значениях F_{Sk} . Характеристика точности для предложенного алгоритма и модификации последовательности интерферометрической обработки для всех случаев имеет меньшую чувствительность к изменению параметра F_{Sk} .

Для экспериментального оценивания эффективности применения различных способов подавления фазового шума построены характеристики точности $\sigma_{\Delta\varphi}(p_k^F)$ для различных параметров трёх фильтров фазового шума — усредняющего, гауссового (рис. 8-Е), адаптивного частотного фильтра Голдштейна. Из полученных в работе характеристик точности был сделан вывод о том, что разные фильтры дают примерно одинаковые результаты по точности относительной фазы, а наиболее эффективен и удобен гауссовый фильтр, так как у него шире диапазон значений варьируемого параметра (частоты среза АЧХ), в пределах которого значение ошибки фазы примерно равно минимально достижимому, само минимальное значение ошибки не зависит от величины коэффициента некогерентного накопления интерферограммы, а вычислительная эффективность (при реализации фильтра в частотной области) довольно высока за счёт использования алгоритмов двумерного быстрого преобразования Фурье и, в отличие от двух других фильтров, не зависит от параметра фильтра.

Помимо этого, произведено сравнение способов оценивания когерентности интерферометрических пар путём сравнения характеристик зависимости отклонения разностного фазового угла от величины когерентности для различных её оценок — $\sigma_{\Delta\varphi}(\rho)$. Было показано, что оценка, вычисляемая как модуль среднего значения элементов комплексной интерферограммы, позволяет наиболее точно предсказывать снижение точности результатов интерферометрической обработки, вызванное действием фазового шума, и обладает наименьшей вычислительной сложностью.

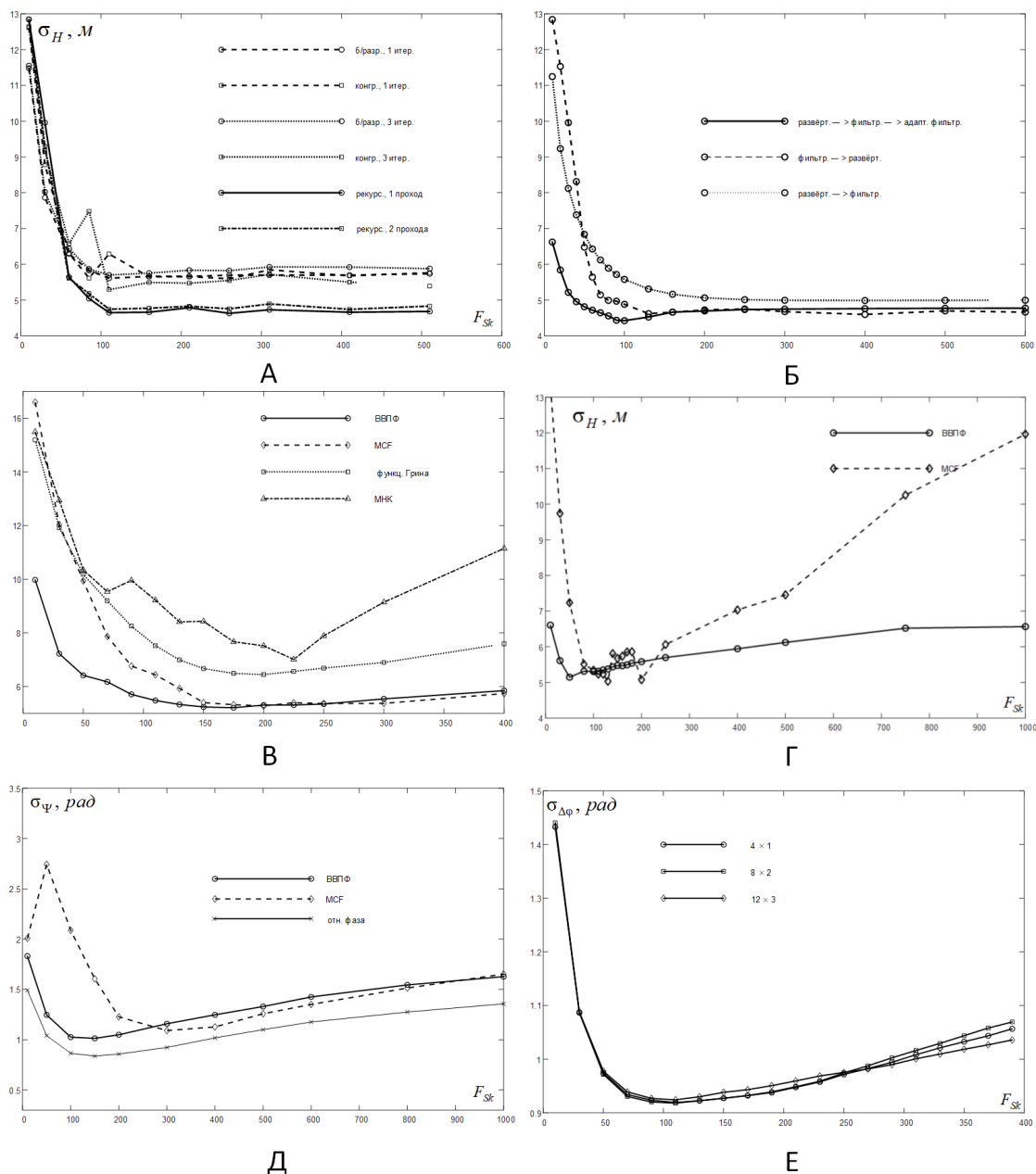


Рис. 8: Характеристики точности высот, абсолютных и относительных фаз: А) для различных вариантов выравнивания встречного вихревого поля; Б) для модификаций последовательности интерферометрической обработки; В,Г) высот для различных алгоритмов развёртывания фазы; Д) абсолютных фаз и относительной фазы для различных алгоритмов развёртывания фазы; Е) относительных фаз для гауссового фильтра фазового шума при различных коэффициентах накопления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основании аналитического обзора принципов, этапов и проблем, связанных с реализацией интерферометрической обработки данных космических РСА высокого пространственного разрешения при построении и оценке точности ЦМР рельефа земной поверхности, выявлены основные источники ошибок определения значений абсолютной фазы и высоты ЦМР. Показано, что значительный вклад в ошибку вносят декорреляции отражённых сигналов и неоднозначность решения задачи развёртывания фазы. Для решения задачи развёртывания фазы разработано несколько десятков алгоритмов, основанных на аппарате из

различных областей современной математики, однако алгоритмы часто не позволяют получить результат с приемлемой точностью, особенно при обработке интерферограмм большого размера и с большим числом разрывов фазы. Также на основании обзора показано, что существующие методики экспериментальной оценки точности предполагают полное завершение интерферометрической обработки, что существенно затрудняет оценку эффективности выполнения основных этапов интерферометрической обработки, в том числе развёртывания фазы.

2. Предложена математическая модель интерферометрической фазы и её разрывов, основанная на комплекснозначном дискретном представлении интерферограммы. Интерферометрическая фаза в модели представляется в виде аргумента функции комплексной переменной с единичной амплитудой, заданной на комплексной плоскости из координат элементов интерферограммы, а разрывы фазы — в виде комбинаций нулей и полюсов этой функции. Модель не использует амплитудную информацию комплексных радиолокационных изображений и позволяет без потери точности сократить объём используемых данных на некоторых этапах интерферометрической обработки (межэлементном некогерентном накоплении, оценивании когерентности, фильтрации фазового шума).

3. Разработан метод развёртывания фазы, заключающийся в построении встречного вихревого поля фазы с использованием прямого устранения разрывов и его рекурсивном выравнивании путём чередования операций построения поля и удаления из него низкочастотной составляющей для подавления различных дефектов поля. Получаемая в результате применения метода абсолютная фаза конгруэнтна исходной интерферометрической фазе. Разработан алгоритм, реализующий метод развёртывания фазы (алгоритм ВВПФ). Вычислительная сложность алгоритма в рамках одной операции построения встречного вихревого поля является линейной относительно произведения размеров интерферограммы и числа точек разрыва на ней. Экспериментально показано, что вычислительная сложность алгоритма по всем итерациям построения поля является почти линейной, что позволяет использовать его для обработки интерферограмм больших размеров. Предложена реализация алгоритма для выполнения на параллельных вычислительных устройствах без потери точности.

4. Разработан метод преобразования эталонных высот в эталонные абсолютные фазы для оценивания точности восстановления абсолютной фазы и высоты рельефа, получаемых при интерферометрической обработке радиолокационных данных, заключающийся в расчёте параметров преобразования эталонных высот в значения эталонных абсолютных фаз и расчёте среднеквадратичных отклонений абсолютных и эталонных фаз либо измеренных и эталонных высот. Метод позволяет не выполнять геопривязку абсолютной фазы для оценивания точности и не требует завершения интерферометрической обработки. На основе метода предложены 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. Методики позволяют получать характеристики точности (по критерию среднеквадратичного отклонения) высот ЦМР или фаз (абсолютных или интерферометрических) при различных значениях параметров алгоритмов обработки и производить анализ эффективности существующих и вновь разрабатываемых алгоритмов интерферометрической обработки и различных модификаций самой обработки.

5. Предложена модификация технологии интерферометрической обработки, в которой развёртывание фазы и фильтрация фазового шума осуществляются параллельно друг другу, а затем производится пост-фильтрация остаточной интерферограммы, после чего результаты операций суммируются. Модификация позволяет предотвращать «склеивание» интерференционных полос при фильтрации фазового шума и, как следствие, образование дополни-

тельных артефактов развёртывания фазы и снижение точности результатов обработки. Показано, что такая модификация позволяет повысить точность определения высот ЦМР на 5–10% и поддерживать её почти постоянной при изменении параметра фильтра фазового шума.

6. С использованием методик экспериментального оценивания точности результатов интерферометрической обработки показано, что предложенный алгоритм развёртывания фазы и предложенная модификация интерферометрической обработки позволяют достигать точности измерения высот и абсолютных фаз на 20–25% лучше, чем другие известные алгоритмы.

Таким образом, в диссертации решены все поставленные задачи.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования. Дальнейшая разработка темы исследования видится в направлении решения следующих задач:

1. Усовершенствование метода выравнивания встречного вихревого поля фазы, направленное на повышение точности восстановления абсолютной фазы.

2. Оценивание точностей цифровых моделей рельефа, получаемых при интерферометрической обработке радиолокационных данных различных космических радиолокационных систем ДЗЗ, в том числе отечественных.

3. Развитие теории оптимальной интерферометрической обработки радиолокационных данных.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в научных изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, и/или перечень международных реферативных баз данных и систем цитирования, утверждённый Аттестационным советом УрФУ

1. **Сосновский, А.В.** Исследование алгоритмов развёртывания фазы при формировании цифровых моделей местности методом космической радиолокационной интерферометрии / А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. № 7. — 2012. — С. 84-92; 0,68 п.л. / 0,35 п.л.

2. Kobernichenko V.G. An experimental estimation of an accuracy of the digital elevation maps obtained by space-based InSAR systems / V.G. Kobernichenko, **A.V. Sosnovsky** // CriMiCo 2013 — 2013 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. Conference Proceedings. — 2013. — P. 1152–1153. (Scopus); 0,15 п.л. / 0,1 п.л.

3. **Sosnovsky, A.V.** A phase unwrapping algorithm for InSAR data processing / A.V. Sosnovsky // 2014 24th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2014). 7–13 September, Sevastopol, Crimea, Russia. — 2014. — № 24. — P. 1155–1156. (WoS); 0,15 п.л.

4. **Sosnovsky, A.V.** A phase unwrapping algorithm for interferometric phase images / A.V. Sosnovsky // Communications in computer and information science. — 2015. — Vol. 542. — P. 146–150. (Scopus); 0,25 п.л.

5. **Sosnovsky, A.V.** An InSAR phase unwrapping algorithm with the phase discontinuity compensation / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko // CEUR Workshop Proceedings. — 2017. — Vol. 2005. — P. 127–136. (Scopus); 0,7 п.л. / 0,4 п.л.

6. **Sosnovsky, A.V.** An InSAR phase noise suppression using coherence maps / A.V. Sosnovsky, N.S. Vinogradova // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology

and Mining Ecology Management, SGEM. — 2018. — Vol. 18. — № 2.3. — P. 19–24. (Scopus); 0,42 п.л. / 0,22 п.л.

7. **Sosnovsky, A.V.** An Efficiency Estimation for Multilooking and Phase Noise Suppression Methods for Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars Data Processing / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko // 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2018 Proceedings. — 2018. — P. 434–438. (Scopus); 0,69 п.л. / 0,4 п.л.

8. **Sosnovsky, A.V.** Processing of large-size InSAR images: Parallel implementation of inverse vortex phase field algorithm / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko // CEUR Workshop Proceedings. 2018. — Vol. 2274. — P. 75–81. (Scopus); 0,45 п.л. / 0,3 п.л.

9. **Sosnovsky, A.V.** Experimental estimation of phase noise filters efficiency for InSAR processing / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko // ITM Web of Conferences. — 2019. — Vol. 30, 15010. (WoS); 0,63 п.л. / 0,4 п.л.

10. **Sosnovsky, A.V.** Phase noise suppression efficiency for InSAR interferograms / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko // Proceedings – 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2019. — 2019. — P. 466–468. (Scopus, WoS); 0,44 п.л. / 0,25 п.л.

11. **Sosnovsky, A.V.** Spectral algorithms efficiency for InSAR phase noise suppression / A.V. Sosnovsky, N.S. Vinogradova // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. Sophia, 2019. — 2019. — P. 633-638. (Scopus); 0,48 п.л. / 0,25 п.л.

12. Kobernichenko, V.G. Accuracy estimation for radar interferometric remote sensing of the earth data / V.G. Kobernichenko, **A.V. Sosnovsky** // AIP Conference Proceedings. — 2019. — Vol. 2116, 390008 (Scopus, WoS); 0,27 п.л. / 0,15 п.л.

13. **Sosnovsky, A.V.** Phase noise suppression in interferometric radar data using Goldstein noise filtration / A.V. Sosnovsky, N.S. Vinogradova // AIP Conference Proceedings. — 2020. — Vol. 2293, 140023 (Scopus); 0,35 п.л. / 0,18 п.л.

14. **Sosnovsky, A.V.** A Method of Phase Unwrapping Algorithms Efficiency Analysis for InSAR Data Processing / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko // Proceedings of ITNT 2020 — 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology. — 2020 (Scopus, WoS); 0,39 п.л. / 0,2 п.л.

15. **Sosnovsky, A.V.** Method for Increasing of the Phase Unwrapping Efficiency by Filtering the Residual Phase Image / A.V. Sosnovsky // Proceedings of ITNT 2021 — 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. — 2021 (Scopus); 0,4 п.л.

16. **Сосновский, А.В.** Исследование и модификация метода формирования встречного вихревого поля для развертывания фазы / А.В. Сосновский // Ural Radio Engineering Journal. — 2021. — Т. 5. № 3. С. 239–257; 0,25 п.л. / 0,99 п.л.

17. **Sosnovsky, A.V.** Modification of Inversed Vortex Phase Field Unwrapping Algorithm for the InSAR Height Measurements / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko // AIP Conference Proceedings. — 2022. — № 2425, 130013 (Scopus); 0,33 п.л. / 0,2 п.л.

Другие публикации:

18. Коберниченко, В.Г. Анализ алгоритмов интерферометрической обработки данных космической радиолокационной съёмки / В.Г. Коберниченко, **А.В. Сосновский** // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2010. — Т. 13, № 3. С. 98–106; 0,85 п.л. / 0,4 п.л.

19. Коберниченко, В.Г. Экспериментальное исследование алгоритма обработки данных космической радиолокационной съемки высокого разрешения при построении цифровых моделей рельефа местности / В.Г. Коберниченко, **А.В. Сосновский** // Радиолокация, навигация, связь: сборник научных трудов XVII международной научной конференции, г. Воронеж, 12-14 апреля 2011. — 2011. — Т.3. — С.2460–2468; 0,76 п.л. / 0,38 п.л.
20. Коберниченко, В.Г. Интерферометрическая обработка данных космической радиолокационной съемки высокого разрешения / В.Г. Коберниченко, **А.В. Сосновский** // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2012. — Т. 15, № 3. С. 75–83; 0,85 п.л. / 0,4 п.л.
21. **Сосновский, А.В.** О точности цифровых моделей рельефа, полученных методом космической радиолокационной интерферометрии / А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т.9. — № 2. С. 122–129; 0,5 п.л. / 0,25 п.л.
22. Коберниченко, В.Г. Особенности построения цифровых моделей рельефа на основе метода космической радиолокационной интерферометрии / В.Г. Коберниченко, **А.В. Сосновский** // ТРУДЫ СПИИРАН. — 2013. — № 5(28). — С. 194-208; 0,92 п.л. / 0,46 п.л.
23. **Сосновский, А.В.** Методика экспериментальной оценки эффективности этапов интерферометрической обработки сигналов РСА / А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко // 26-я Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КРЫМИКО 2016). Сборник материалов. — 2016. — С. 2716-2722; 0,33 п.л. / 0,2 п.л.
24. **Сосновский, А.В.** Об оценивании точности цифровых моделей рельефа, получаемых методом космической радиолокационной интерферометрии / А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко // Радиолокация, навигация, связь. XXII международная научно-техническая конференция. Сборник материалов. — 2016. — С. 1074–1081; 0,63 п.л. / 0,4 п.л.
25. **Сосновский, А.В.** Анализ эффективности алгоритмов интерферометрической обработки комических радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли с использованием эталонных высот рельефа местности // Сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Институт космических исследований Российской академии наук. — 2017. — С. 61; 0,08 п.л.
26. **Сосновский, А.В.** Повышение эффективности этапов интерферометрической обработки радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли / А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко // 28-я Международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КРЫМИКО 2018). Сборник материалов. — 2018. — Р. 1598–1604; 0,33 п.л. / 0,2 п.л.
27. **Сосновский, А.В.** Интерферометрическая обработка данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности: состояние и проблемы / А.В. Сосновский // Ural Radio Engineering Journal. — 2020. — Т. 4. № 2. С. 198–233; 1,53 п.л.
28. **Сосновский, А.В.** Оценивание точности восстановления абсолютной фазы при интерферометрической обработке данных радиолокаторов с синтезированной апертурой / А.В. Сосновский // Журнал радиоэлектроники. — 2021 — № 7. С. 1–24; 1,06 п.л.
29. **Сосновский, А.В.** Точность восстановления абсолютной фазы при интерферометрической обработке радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли / А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром. МИ ВлГУ. — 2022. — С. 413-421; 0,74 п.л. / 0,4 п.л.

30. **Сосновский, А.В.** Рекурсивный алгоритм построения встречного вихревого поля для развёртывания фазы / А.В. Сосновский // XV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. — Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. — 21–23 ноября 2022 г. — С. 37–42; 0,48 п.л. / 0,3 п.л.

31. **Сосновский, А.В.** Повышение эффективности этапов интерферометрической обработки радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли / А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко // XV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. — Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. — 21–23 ноября 2022 г. — С. 43–47; 0,44 п.л. / 0,24 п.л.